

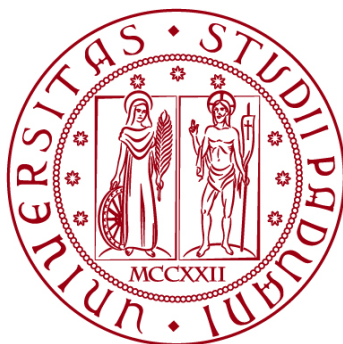
**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale*

*Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

*A.A 2022/2023*



**TESI DI LAUREA**

**“LA PIROLISI: PROCESSO  
SOSTENIBILE PER LA  
VALORIZZAZIONE DEI RIFIUTI”**

Keywords: Pirolisi, Tecnologie, Rifiuti, Processo, Energia

**Relatrice:** Maria Cristina Lavagnolo

**Laureando:** Matteo Barin n.m. 1166820



## INDICE

INDICE .....	3
<b>0-INTRODUZIONE.....</b>	<b>5</b>
<b>1-DEFINIZIONE PIROLISI .....</b>	<b>7</b>
1.1-Excursus storico della pirolisi.....	7
1.1.1 Pirolisi nell’Età del Bronzo.....	7
1.1.2 Pirolisi nell’Antico Egitto .....	7
1.1.3 Pirolisi in Germania nel 1920 .....	8
1.1.4 Processo Karrick .....	8
1.2- Matrici pirolizzabili .....	8
1.2.1 Definizione matrice pirolizzabile e indice di pirolizzabilità .....	8
1.2.2 Plasmix: descrizione e utilizzo tramite pirolisi .....	9
1.2.3-RAEE: descrizione e utilizzo in pirolisi .....	11
1.2.4-Rifiuti solidi urbani (RSU): descrizione e utilizzo in pirolisi.....	13
1.2.5-Fanghi civili e industriali: descrizione e utilizzo in pirolisi .....	14
1.2.6-Biomasse: descrizione e utilizzo in pirolisi .....	15
<b>2-TECNOLOGIE DELLA PIROLISI .....</b>	<b>17</b>
2.1- Tipologie classiche.....	17
2.2- Burgau.....	17
2.2.1 Breve descrizione storica .....	17
2.2.2 Descrizione impianto e processo.....	18
2.3- Hamm-Uentrop .....	21
2.3.1 Descrizione impianto .....	21
2.4- Differenze e similitudini Burgau e Hamm-Uentrop .....	23
2.5- Piromak.....	25
2.5.1 Breve descrizione storica .....	25
2.6-Pirolisi per la pulizia di lattine in alluminio .....	28
<b>3-CONNESSIONI TRA TECNOLOGIE E MATRICI PIROLIZZABILI .....</b>	<b>29</b>
3.1- Matrici entranti in impianto .....	29
3.2- Connessione tra matrici entranti, tecnologia utilizzata e obiettivo.....	29
<b>4-IMPATTI AMBIENTALI.....</b>	<b>31</b>
<b>5-FUTURI SVILUPPI .....</b>	<b>39</b>
5.1-Pirolisi Diffusa come nuovo modello di riferimento per trattamento rifiuti.....	39
5.2-Pirolisi applicata a settori atipici.....	39
5.2.1 Pirolisi come produzione di bio-assorbitori per trattare percolati da discarica.....	39
5.2.2 Pirolisi per trattamento termico di terreni contaminati .....	40
5.3-ELITE Ambiente S.r.l. e impianto pilota di Pirogassificazione.....	41
5.3.1 Descrizione del processo.....	42

5.3.2 Environmental Footprints .....	47
5.3.3 Trattamenti .....	51
<b>6-VISIONE ECONOMICA DELLA PIROLISI .....</b>	<b>55</b>
<b>7-LATI NEGATIVI E OBIEZIONI RIGUARDO LA PIROLISI .....</b>	<b>57</b>
<b>8-CONCLUSIONE.....</b>	<b>59</b>
<b>9-APPENDICI .....</b>	<b>63</b>
<b>10-BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....</b>	<b>63</b>

## **0-INTRODUZIONE**

Ogni anno la produzione ed il consumo delle plastiche aumenta. Negli anni 50 la produzione annuale era di 1,7 milioni di tonnellate mentre nel 2015 siamo passati a oltre 310 milioni di tonnellate. Questo spaventoso incremento ha portato a istituire varie riforme per lo smaltimento e la diminuzione dei rifiuti a monte come l'Agenda 21, ovvero la conferenza stampa di Rio de Janeiro avvenuta nel 1992, che stilò i principi guida per uno sviluppo sostenibile per il ventunesimo secolo e pose obiettivi sociali, economici e istituzionali. Attualmente gran parte dei rifiuti vengono portati in discarica o incenerimento. Con questa tesi voglio mostrare come una buona fetta di ciò che finisce in quei luoghi potrebbe invece essere resa più nobile, riutilizzata, rivenduta ad aziende di raffinamento, diventare energia termica o smaltita in modo molto meno inquinante per l'ambiente. La risposta a ciò che ho elencato è la pirolisi. Viene definito il suo significato nel capitolo 1, descritte le matrici che possono essere valorizzate e riutilizzate tramite questo processo chimico.

Nel capitolo 2 viene posta attenzione sulle tecnologie classiche e sulle tecnologie che attualmente utilizzano la pirolisi.

Nel capitolo 3 vengono evidenziate le differenze tra queste varie tecnologie. Nel capitolo 4 vengono analizzati gli impatti ambientali di questo processo, collegati alle tecnologie analizzate. Il cuore di questa tesi sarà nel capitolo 5, Futuri sviluppi, in cui, dopo una rapida descrizione di alcuni possibili utilizzi, porterò in attenzione l'impianto pilota di pirogassificazione di Elite Ambiente S.r.l., azienda dove ho svolto il tirocinio. Viene descritto l'intero processo, vengono calcolati i vari Environmental Footprints e vengono proposti trattamenti per i flussi d'aria e d'acqua in uscita. Infine, nel capitolo 6 viene proposta una visione della pirolisi dal lato economico, nel capitolo 7 vengono discussi alcuni lati negativi di questo processo e nel capitolo 8 viene stilata la conclusione.



## 1-DEFINIZIONE PIROLISI

La pirolisi è un processo termico che sottopone matrici solide o liquide ad una divisione in molecole volatili più piccole in assenza di ossigeno o di agenti ossidanti (necessari per bruciare quasi tutti i composti). Da questa definizione si deduce che la pirolisi decompone un materiale nei suoi radicali solo per azione dell'energia termica. Essendo un processo che avviene tramite l'apporto di calore, più ne viene fornito, più velocemente avverrà. Un altro metodo per diminuire il tempo della pirolisi è l'uso di catalizzatori che permettono l'abbassamento dell'energia di attivazione.

Il processo avviene a temperature tra i 400 °C e gli 800 °C e i prodotti risultanti si dividono in:

- frazione liquida (synoil): dovuta alla condensazione della frazione volatile dei prodotti.
- frazione gassosa (syngas): costituita dalle componenti non condensabili della frazione volatile dei prodotti.
- frazione solida (char): a base carboniosa, per l'elevato contenuto di carbonio; per questo motivo ha un elevato potere calorifico; in percentuale, è spesso la frazione minore delle 3.

Le proporzioni dipendono dalle tecnologie utilizzate e dai parametri di reazione.

### 1.1-Excursus storico della pirolisi

#### 1.1.1 Pirolisi nell'Età del Bronzo

Il processo della pirolisi è conosciuto sin dai tempi antichi. Alla fine dell'età del Bronzo, sulle rive del lago di Ledro nel Trentino orientale era presente una distilleria che usava materiali vegetali non fossili per la produzione di catrame e pece.

#### 1.1.2 Pirolisi nell'Antico Egitto

Nell'antico Egitto esso fu utilizzato per la produzione della carbonella dal legno. La carbonella vegetale si creava in carbonaie, ovvero pozzi scavati nella terra che avevano al centro un'asta che si prolungava fino al fondo. Intorno all'asta venivano accuratamente disposti rami intrecciati, così da non lasciare alcuno spazio all'aria. Il tutto veniva ricoperto con erbe, giunchi e con uno strato di terra. Quando l'asta veniva estratta, attraverso il foro lasciato da questa, si introduceva il carbone ardente.

Una volta iniziata la reazione, si chiudeva il foro con della terra. Il catrame e l'acqua fuoriuscivano all'esterno e la legna si trasformava in carbone.

### 1.1.3 Pirolisi in Germania nel 1920

In tempi più recenti, la Germania degli anni '20, colma di legno che non sapeva come utilizzare e priva di petrolio, usava la pirolisi nella conversione della carbonizzazione per produrre catrame di carbone, olio e vapore acqueo, syngas non condensabile e carbone di legna (char) come inerte. L'olio e il catrame di carbone venivano successivamente trattati per idrogenizzazione per rimuovere zolfo e azoto, dopo essersi trasformati in combustibili. I tedeschi utilizzavano un processo in particolare, ovvero il processo Karrick, il quale venne inventato circa nel 1920.

### 1.1.4 Processo Karrick

Il processo Karrick è un processo di carbonizzazione LTC (low temperature carbonization, cioè a bassa temperatura) della durata di circa 3 ore che consiste nel riscaldare il carbone da 360 a 750 °C in assenza di aria che usa una storta ermetica. Venivano usate queste temperature poiché ottimizzano la produzione di catrami di carbone più ricchi di idrocarburi più leggeri rispetto al normale catrame di carbone e, soprattutto, per la produzione di coke metallurgico. I liquidi prodotti, o synoil, sono sottoprodotti. Il prodotto principale è il semicoke, ovvero un combustibile solido e senza fumo. L'acqua, il petrolio, il catrame di carbone e il syngas che ne risultano fuoriescono dalla storta attraverso valvole di uscita poste sul fondo. Il residuo (carbone vegetale o semicoke) rimane nella storta. Sebbene questo processo sia destinato alla carbonizzazione del carbone, può essere anche usato per il trattamento di scisto bituminoso, di lignite o di qualsiasi materiale carbonioso. Per la produzione su scala commerciale, era utilizzata una storta di circa 90 centimetri di diametro e 6 metri di altezza. Il processo di carbonizzazione a bassa temperatura Karrick non produce anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), ma produce effettivamente una significativa quantità di monossido di carbonio.

## 1.2- Matrici pirolizzabili

### 1.2.1 Definizione matrice pirolizzabile e indice di pirolizzabilità

In tempi moderni ci sono diversi ambiti in cui la pirolisi viene utilizzata per trattare le matrici, ovvero le tipologie di rifiuto univocamente determinate, in modo tale da ricavare energia e/o composti più



semplici. Prima di descriverne alcuni, ricordando che la pirolisi è una decomposizione termica in atmosfera inerte, definisco matrice pirolizzabile quella matrice che per trattamento termico ad una determinata temperatura si decompone parzialmente con il rilascio di composti volatili e la formazione di un residuo solido. Il grado di pirolizzabilità può essere dato dalla frazione ponderale percentuale di parte volatilizzata rispetto alla massa di matrice cioè:

$$(1 - (m_{residuo} \div m_{matrice})) \times 100$$

con m=massa. Cercando di proporre un modulo per qualificare la pirolizzabilità di un rifiuto, definisco Indice di pirolizzabilità ( $I_p$ ) un numero puro con estremi zero e cento, dove zero coincide con un materiale non pirolizzabile e cento con un materiale totalmente pirolizzabile. Questo indice mostra empiricamente la tendenza di un materiale ad essere disgregato tramite pirolisi ad una temperatura di 600 °C, scelta perché in media ogni materiale, se pirolizzabile, si scinde quando arriva a questa temperatura.

Per la valutazione di una matrice omogenea, si prende un campione di 100 grammi senza dover attuare alcun pretrattamento; in caso fosse umida serve prima procedere con un'eventuale pre-essiccazione. Per una matrice disomogenea il pretrattamento è necessario per prelevare un campione rappresentativo e consiste semplicemente nel prendere 10 campioni diversi ognuno di 1 chilogrammo; dopo averli essiccati, si pongono all'interno di un tritatore fino a che non abbia spezzato il materiale ad una misura inferiore ai 5 millimetri; successivamente si mescola il tritato e si preleva il campione finale dal peso pari a cento grammi.

Dopo un trattamento in un forno elettrico stabile e pratico nella regolazione della temperatura tra 10-700 °C, con sensibilità pari a  $\pm 5$  °C, si procede al calcolo dell'indice di pirolizzabilità tramite un rapporto percentuale tra la differenza tra il peso lordo essiccato con il peso lordo pirolizzato e tra il peso lordo essiccato con il peso della tara. Il peso della tara è il peso del contenitore metallico pulito accuratamente posto all'interno del forno che contiene il campione; il peso lordo essiccato è il peso del campione dopo che il forno è arrivato alla temperatura di 105°C e infine il peso lordo pirolizzato è la frazione non pirolizzabile, ovvero la frazione solida residuale detta char.

$$I_p = ((P_{Lordo_{Essic}} - 3P_{Lordo_{Pirolizzato}}) \div (P_{Lordo_{Essic}} - P_{Tara})) \times 100$$

### 1.2.2 Plasmix: descrizione e utilizzo tramite pirolisi

Tra le materie plastiche vi è una matrice che, se trattata con la pirolisi, porterebbe a una svolta nell'economia dei rifiuti e nel riciclo in generale: il plasmix. Esso è l'insieme di plastiche eterogenee incluse negli imballaggi post-consumo e non recuperate come singoli polimeri. È circa il 45% del materiale trattato dagli impianti di selezione; nel 2017 si è stimato di aver prodotto una quantità di plasmix pari a 450000 tonnellate e questo numero è ancora in crescita. È composto da un misto

poliolefinico e i costituenti più abbondanti sono polipropilene, polietilene ad alta densità, polietilene a bassa densità, altre plastiche non poliolefiniche, carta, vetro e inerti.

Tabella sulla caratterizzazione chimica del plasmix:

Nome	Unità di misura	Valore	Nome	Unità di misura	Valore
Potere calorifico	GJ/tonTS	25.3	S	%TS	0.08
H <sub>2</sub> O	%	23	Al	%TS	0.56
TS	%	77	As	%TS	1x10 <sup>-2</sup>
TC	%TS	70.6	Cd	%TS	0.0006
TOC	%TS	55.4	Cr	%TS	0.01
Ca	%TS	1.1	Cu	%TS	1x10 <sup>-2</sup>
Cl	%TS	0.62	Fe	%TS	0.08
F	%TS	0.01	Hg	%TS	0.00074
H	%TS	6.4	Mg	%TS	0.04
K	%TS	0.12	Mn	%TS	0.06
N	%TS	1.0	Ni	%TS	7x10 <sup>-3</sup>
Na	%TS	0.11	Pb	%TS	0.05
O	%TS	11.1	Zn	%TS	7x10 <sup>-3</sup>
P	%TS	0.56			

Al momento viene utilizzato per la produzione di pezzi di plastica mista (grossolani) e per la fabbricazione di sabbie sintetiche dalle quali si ottengono calcestruzzi alleggeriti. Per le quantità di plastica in gioco, tutto ciò è parte di un mercato piuttosto limitato e poco idoneo. Poiché le plastiche del plasmix hanno un potere calorifico prossimo a quello dei combustibili solidi tradizionali, l'utilizzo prevalente è la produzione di combustibile solido secondario (CSS) destinato a termovalorizzatori, centrali termoelettriche o cementifici.

La produzione del CSS consiste nella rilavorazione del plasmix in pezzetti più piccoli e riducendo il contenuto di sostanze indesiderate come cloro, metalli e inerti vari. Il problema più grande è che l'industria italiana del cemento è in crisi e molte cementerie sono state chiuse o non sono più attive.

La pirolisi si presenta in maniera importante come soluzione per un trattamento efficace del plasmix/CSS. Essa consiste nella rottura delle catene polimeriche che costituiscono le poliolefine e

le trasforma in una miscela di idrocarburi (più inerti). Grazie a questo processo si riesce a produrre un synoil assimilabile al gasolio utilizzabile come combustibile o in raffineria.

### 1.2.3-RAEE: descrizione e utilizzo in pirolisi

Negli ultimi anni si è registrato un elevato tasso di sviluppo e ricerca di nuove apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) sempre più all'avanguardia, che porta ad un'obsolescenza programmata dei dispositivi, in particolare degli smartphones. I RAEE sono rifiuti consistenti in apparecchiature elettriche ed elettroniche fuori uso o inutilizzate. Essi sono divisi in 5 gruppi: R1, R2, R3, R4 e R5.

R1: apparecchiature per lo scambio di temperatura con fluidi come frigoriferi, condizionatori, radiatori a olio e congelatori;

R2: grandi apparecchiature come lavatrici, lavastoviglie, cappe e forni;

R3: Tv e Monitor, a tubo catodico e al plasma;

R4: piccoli elettrodomestici come stampanti di varia grandezza, dispositivi medici, pannelli fotovoltaici, giocattoli vari e telefoni cellulari di ogni tipo;

R5: sorgenti luminose, cioè tubi fluorescenti, lampade fluorescenti, lampade a scarica ad alta densità e LED.

Tonnellate di RAEE gestite nel 2018 da Ecodom:

	TONNELLATE GESTITE DA ECODOM NEL 2018					Totale
	R1	R2	R3	R4	R5	
Emilia-Romagna	3.432	9.158	190	108	-	12.888
Friuli-Venezia Giulia	709	1.780	9	91	-	2.589
Liguria	1.095	2.662	93	28	-	3.878
Lombardia	5.677	14.058	337	274	-	20.346
Piemonte	3.410	2.968	206	19	3	6.606
Trentino-Alto Adige	581	1.787	32	10	-	2.410
Valle d'Aosta	115	437	-	39	-	591
Veneto	3.099	6.310	228	110	-	9.747
<b>Nord</b>	<b>18.118</b>	<b>39.160</b>	<b>1.095</b>	<b>679</b>	<b>3,0</b>	<b>59.055</b>
Lazio	2.856	4.414	188	91	-	7.549
Marche	892	1.350	121	40	-	2.403
Toscana	2.861	7.442	212	66	-	10.581
Umbria	640	871	103	3	-	1.617
<b>Centro</b>	<b>7.249</b>	<b>14.077</b>	<b>624</b>	<b>200</b>	<b>-</b>	<b>22.150</b>
Abruzzo	536	627	74	16	-	1.253
Basilicata	302	189	5	7	-	503
Calabria	950	1.035	286	-	-	2.271
Campania	3.387	1.746	104	62	-	5.299
Molise	450	319	-	-	-	769
Puglia	1.776	984	140	109	-	3.009
Sardegna	1.430	3.366	89	37	-	4.922
Sicilia	2.483	3.554	184	64	-	6.285
<b>Sud e Isole</b>	<b>11.314</b>	<b>11.820</b>	<b>882</b>	<b>295</b>	<b>-</b>	<b>24.311</b>
<b>Italia</b>	<b>36.681</b>	<b>65.057</b>	<b>2.601</b>	<b>1.174</b>	<b>3,0</b>	<b>105.516</b>

Figura 1, Ecodom

Di particolare interesse sono i dispositivi appartenenti al raggruppamento R4 che contengono circa il 35% in peso di plastica che comprende più di 15 tipologie diverse di polimeri e un impiego intensivo di additivi. I RAEE sono costituiti per più del 50% da polistirene e polistirene ad alto impatto (HIPS) nel rivestimento esterno, tranne i cellulari che invece hanno i policarbonati. Le diverse tipologie di AEE contengono sostanze altamente pericolose, tra cui:

-PIOMBO: provoca effetti acuti, cronici e tossici per gli esseri viventi accumulandosi nell'ambiente. Può causare grossi danni al sistema nervoso centrale e periferico dell'uomo e danneggiare il sistema a livello vascolare. Il piombo è presente nei tubi catodici, nelle batterie e nelle saldature degli apparecchi;

-CROMO ESAVALENTE E POLICLOBIFENILI: è una sostanza cancerogena, provoca bronchiti asmatiche e reazioni allergiche all'uomo e può danneggiare il DNA. Serve a ridurre l'infiammabilità di componenti e apparecchi elettrici ed elettronici;

-MERCURIO: provoca danni al cervello, al cervelletto e al coordinamento. La sua esposizione causa l'inibizione dello sviluppo mentale e, infatti, i soggetti più a rischio sono le donne in gravidanza e i bambini. Si trova all'interno di interruttori, apparecchi di telecomunicazioni, termostati, attrezzature mediche e nelle sorgenti luminose a scarica.

-CFC-HCFC: i clorofluorocarburi e gli idroclorofluorocarburi arrivano intatti nella stratosfera e reagiscono con le molecole di ozono riducendone lo strato con il conseguente assottigliamento della

fascia di ozono che determina un aumento delle radiazioni ultraviolette che sono causa di tumori alla pelle, malattie agli occhi e indebolimento del sistema immunitario. I CFC e gli HCFC sono presenti nei circuiti di refrigerazione di frigoriferi, di congelatori e di condizionatori.

Tramite il processo di pirolisi, i RAEE sono prodotti ottimi per ricavare char dalla divisione dei suoi componenti per lo più plastici. Il ricavato solido è molto più nobile rispetto al prodotto di partenza e può contenere vari metalli importanti; ad esempio, dagli smartphones si ottiene oro, argento, rame e una piccola quantità di platino.

#### 1.2.4-Rifiuti solidi urbani (RSU): descrizione e utilizzo in pirolisi

Un'ulteriore matrice potenzialmente ottima da pirolizzare è l'RSU, ovvero i rifiuti solidi urbani. Dal primo gennaio del 2019 è entrata in vigore la sua definizione attuale che descrive con precisione quali sono gli RSU e quali no. Le tipologie comprese sono:

- rifiuti che provengono dalle economie domestiche
- rifiuti che provengono da imprese con meno di 250 posti di lavoro a tempo pieno aventi una composizione analoga ai primi in termini di sostanze contenute e di proporzioni quantitative.

Nello specifico, tutti i rifiuti provenienti dalle economie domestiche sono definiti rifiuti urbani.

In particolare, essi si dividono in:

- rifiuti solidi urbani (RSU): rifiuti misti e non riciclabili, quindi destinati all'incenerimento;
- rifiuti raccolti separatamente: rifiuti destinati al riciclaggio come carta, cartone, rifiuti vegetali, vetro;
- rifiuti speciali: rifiuti che hanno bisogno di tecniche fisico-chimiche particolari a causa delle loro caratteristiche.

D'altro canto, per le amministrazioni pubbliche della Confederazione dei Cantoni e dei Comuni, la composizione del rifiuto è l'unico fattore che distingue un rifiuto urbano da qualsiasi altro rifiuto. Ad esempio, se per sostanze contenute e proporzioni quantitative i rifiuti originati da amministrazioni pubbliche sono analoghi ai rifiuti domestici, vengono considerati rifiuti urbani, indipendentemente dal numero dei posti di lavoro a tempo pieno. Un caso particolare è quello degli enti amministrativi decentrati, ovvero gli enti autonomi di diritto pubblico come le università, le aziende di trasporti pubblici e gli ospedali. I rifiuti provenienti da queste aziende sono trattati diversamente rispetto all'amministrazione pubblica poiché sono enti dotati di un proprio numero IDI, di un proprio patrimonio e di una propria personalità giuridica. Queste aziende amministrative sono più simili alle imprese e pertanto solo i rifiuti derivanti da enti amministrativi con meno di 250 posti di lavoro a

tempo devono essere considerati rifiuti urbani, a condizione che la composizione e le proporzioni quantitative siano analoghe ai rifiuti provenienti dalle economie domestiche. Lo smaltimento incontrollato dei rifiuti sul suolo determina una serie di impatti negativi sulle componenti ambientali e sulla salute pubblica. L'inquinamento degli RSU è sintetizzabile in diverse categorie:

-Inquinamento del sottosuolo: i contaminanti contenuti nei rifiuti possono infiltrarsi nel sottosuolo direttamente o tramite dilavamento da parte delle acque di pioggia. La pericolosità è connessa all'alta concentrazione di composti inquinanti, spesso tossici, che portano alla contaminazione di vaste estensioni dell'acquifero rendendolo inutilizzabile per l'uso potabile.

-Inquinamento estetico-paesaggistico: sebbene sia tipica di ogni tipologia di rifiuto, si manifesta nei suoi aspetti più vistosi per depositi incontrollati di RSU. I rifiuti depositati rappresentano un rischio immediato o potenziale di sviluppo degli altri fenomeni di inquinamento.

-Inquinamento dell'aria: nel caso degli RSU con vari idrocarburi aromatici e idrocarburi clorurati presenti nelle bombolette spray, portano ad un danneggiamento tossico all'ambiente. Il caso tipico dei rifiuti solidi urbani è l'emissione di composti volatili formati a seguito di processi biodegradativi dei rifiuti.

Ogni anno, circa 1.9 bilioni di tonnellate di rifiuti solidi urbani sono prodotti nel mondo, ovvero una produzione annua di 218 chilogrammi per persona. I motivi che inducono ad usare la pirolisi sono la produzione di carburante e biomasse per ottenere bio carburante e altre componenti in assenza di aria. Il vantaggio che porta ad usare questo processo al posto di altri come la gassificazione, la combustione o l'inceneritore è la produzione di bio olio e di gas sintetico (syngas) e char come sottoprodotti. Un'altra ragione, non da meno, è la maggiore efficienza nel recupero di energia rispetto alle altre reazioni termochimiche.

#### 1.2.5-Fanghi civili e industriali: descrizione e utilizzo in pirolisi

I fanghi da depurazione sono la frazione solida ottenuta dai trattamenti depurativi delle acque reflue civili e industriali e in essi si concentrano diversi inquinanti. I fanghi contengono per la maggior parte sostanze organiche spesso biodegradabili, una più piccola frazione di sostanze inorganiche con una percentuale di sostanze secche dipendente dal processo utilizzato. Proprio per la loro elevata biodegradabilità, si possono trattare con un processo biologico. I fanghi si dividono in due grandi categorie: fanghi civili e fanghi industriali. I fanghi civili sono caratterizzati da un elevato contenuto di materiale organico, hanno il livello di Biochemical Oxygen Demand (o BOD) molto elevato e sono costituiti da materiale solido con un tenore variabile di umidità che supera il 60%. I fanghi

industriali hanno un alto livello di Chemical Oxygen Demand o COD, contengono sostanze pericolose e sostanze speciali come metalli pesanti, idrocarburi e alogenati che portano vari problemi alla salute: all'esposizione ai primi sono associati molteplici effetti con diversi gradi di gravità e condizioni come problemi ai reni e alle ossa, disordini neurocomportamentali e dello sviluppo, elevata pressione sanguigna e sono cancerogeni poiché contengono cadmio, piombo e mercurio; la tossicità degli idrocarburi deriva sia da un contatto diretto che dai suoi metaboliti epatici che sono potenzialmente mutageni e cancerogeni; i danni dei solventi alogenati sono dovuti dalla loro tossicità che, se inalati, riducono lo stato di coscienza e, se ingeriti, si manifestano sintomi neurologici, digestivi, aritmie cardiache e problemi respiratori. Quando i fanghi civili, dopo essere stati trattati negli impianti di depurazione, possono essere riutilizzati in alcuni modi, come nell'agricoltura, i fanghi industriali sono tutti destinati in termodistruzione o in discarica per via dei problemi che porterebbero gravi danni alla salute. Una solida soluzione a questi ultimi è l'utilizzo della pirolisi che potenzialmente porterebbe vari vantaggi. I risultati di questo processo chimico possono essere utilizzati per la vendita di energia di vario tipo (tipicamente termica) o si può raffinare ulteriormente il char fino a che non diventa un metallo utilizzabile.

#### 1.2.6-Biomasse: descrizione e utilizzo in pirolisi

Al giorno d'oggi si può affermare con certezza che una matrice in particolare si sta affermando come una tra le fonti energetiche più importanti di primario interesse; sto parlando della biomassa. Con questo termine si indica ogni materiale organico di origine animale o vegetale che varia da insetti a rifiuti organici rinnovabili.

Per descriverla in maniera più specifica, cito la definizione data dalle Nazioni Unite alla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici del 2005: "Materiale organico non fossilizzato e biodegradabile derivato da organismi vegetali, animali e microorganismi. Può includere anche prodotti, sottoprodotti, residui e scarti agricoli, forestali e delle industrie attinenti, così come le frazioni organiche biodegradabili e non fossilizzate presenti nei rifiuti industriali e urbani.". A differenza dei combustibili fossili, la biomassa è considerata una fonte rinnovabile e un combustibile a zero emissione per la velocità alla quale avvengono i processi di formazione che sono simili alla velocità con la quale viene consumata e perché l'anidride carbonica rilasciata dalla sua combustione non comporta variazioni sul livello totale di CO<sub>2</sub> nella Terra. Questa matrice si può dividere in due categorie principali:

-biomassa primaria: derivante direttamente da animali o piante e comprende foglie, piante, legno e colture;

-biomassa di scarto: derivante da altre biomasse e includono la frazione biodegradabile degli RSU, deiezioni umane e animali, gas prodotti dalle discariche, rifiuti agricoli e acque reflue.

Avendo un volume eccessivo e un rapporto tra potere calorifico inferiore con il peso piuttosto basso, la biomassa tal quale non è molto utilizzabile su ampia scala come fonte di energia sostitutiva. Ad oggi, industrialmente parlando, viene utilizzata al meglio nella conversione biochimica e nella conversione termochimica che prevedono una produzione di combustibili in fase liquida, come il biodiesel, oppure in fase gassosa, utilizzata molto perché facilmente stoccabile e con alta densità energetica.

Infatti, procedendo con una combustione diretta, si può estrarre una grande quantità di energia termica dalla biomassa. Dopo un'eventuale essiccazione, la pirolisi gioca un ruolo fondamentale in questo processo per decomporre e volatilizzare questa importante matrice che si scinde circa a 400 °C.



## 2-TECNOLOGIE DELLA PIROLISI

### 2.1- Tipologie classiche

Esistono diversi tipi di processi pirolitici in base alla temperatura a cui è sottoposta la matrice in entrata:

-pirolisi lenta: avviene a temperature vicine a 500 °C, è caratterizzata da lunghi tempi di reazione e le tre frazioni in uscita sono circa in uguale proporzione;

-carbonizzazione: avviene a temperature fra 300 °C e 500 °C e viene utilizzata per recuperare soltanto la frazione solida o char. È il più antico e conosciuto processo di pirolisi;

-fast pirolisi: avviene a temperature medio basse, ovvero tra 500 °C e 650 °C, è caratterizzata da veloci reazioni di gassificazione con tempi di contatto brevi per ridurre la formazione di composti intermedi e favorendo la produzione della frazione liquida o synoil che può arrivare fino all'80% in peso della biomassa in entrata;

-flash pirolisi: avviene a temperature superiori a 650 °C, con tempi di contatto inferiori ad un secondo per favorire la produzione della frazione gassosa o syngas.

### 2.2- Burgau

#### 2.2.1 Breve descrizione storica

Un esempio di impianto di pirolisi è quello installato a Burgau, in Germania, realizzato tra il 1983 ed il 1984.

Fino al 2001 l'impianto di Burgau è stato l'unico impianto commerciale a livello mondiale incentrato sul processare i rifiuti solidi urbani, i fanghi industriali e rifiuti ingombranti o bulky waste che assicura il completo smaltimento dei rifiuti di una contea in funzionamento continuo. Quando è entrata in vigore l'ordinanza federale sul controllo delle immissioni (17. BImSchV), l'impianto è stato cambiato per adeguarsi e rispettare i valori limite riguardanti l'inquinamento nei fiumi. Grazie alle caratteristiche del processo di pirolisi che richiedono requisiti di processo per il retrofit piuttosto bassi, il cambiamento è stato economico.

Oggi l'impianto di pirolisi per i rifiuti di Burgau è ancora un impianto municipale ed è tra gli impianti di smaltimento dei rifiuti più economici.

### 2.2.2 Descrizione impianto e processo

L'impianto di pirolisi dei rifiuti di Burgau elabora rifiuti urbani e industriali, rifiuti ingombranti e fanghi di depurazione in due forni rotanti, ciascuno con una capacità di 3 t/h. Questi materiali di scarto sono consegnati e trattati termicamente con un rapporto di 20.000 t/a di rifiuti urbani, 3.000 t/a di rifiuti industriali e 5.000 t/a di fanghi di depurazione. I rifiuti urbani, industriali e ingombranti sono consegnati dai veicoli di raccolta dei rifiuti e scaricati nel bidone di stoccaggio dei rifiuti grossolani. Dal contenitore dei rifiuti, la miscela viene raccolta da una gru, scaricata su due frese del rotore azionate in alternanza e tagliata a pezzi per ottenere bordi di circa 30 centimetri di lunghezza. Dalle frese del rotore, il materiale viene consegnato via scivoli opportunamente disposti nel bidone di stoccaggio dei rifiuti fini. I fanghi di depurazione vengono scaricati direttamente nel contenitore dei rifiuti fini. Una gru mescola i rifiuti e i fanghi di depurazione al fine di ottenere una miscela altamente omogenea. Dalle tramogge di alimentazione, un trasportatore a piastre a velocità regolata e un trasportatore a nastro trasportano i rifiuti allo scivolo di alimentazione, costituito da una valvola a scorrimento a tenuta di gas e uno scivolo. Non appena il livello massimo di riempimento è raggiunto, monitorato da un indicatore di livello radiometrico, i nastri trasportatori e le piastre vengono spenti e il cancello a tenuta di gas sopra lo scivolo di alimentazione si chiude. Una coclea di alimentazione posizionata a valle dello scivolo di alimentazione convoglia la miscela di rifiuti nel forno dove avviene la pirolisi. Allo stesso tempo, circa 12-20 kg di calce viva per tonnellata di rifiuti vengono introdotti nel forno. Non appena il livello di riempimento raggiunge un minimo, il cancello dello scivolo di alimentazione si apre e l'alimentazione, tramite trasportatori a nastro e piastra, ricomincia. Il processo di pirolisi dei materiali di scarto avviene in due forni rotativi riscaldati indirettamente. I forni hanno una lunghezza (da riscaldati) di circa 20 metri e un diametro interno di circa 2,2 metri. Entrambi i forni rotativi vengono azionati a una leggera pressione negativa di circa 0,01 bar. I due forni rotativi sono riscaldati indirettamente con gas di combustione dal gas di pirolisi con una temperatura di 1.200 °C. Il gas effluente è condotto intorno ai gusci del forno tramite una muffola stazionaria e si raffredda fino a circa 600-650 °C alla sua uscita. La superficie esterna dei forni rotanti viene riscaldata ad una temperatura di circa 650°C. Nella prima parte del guscio del forno i materiali di scarto vengono principalmente essiccati, ma successivamente vengono riscaldati fino alla temperatura effettiva di processo di circa 500 °C. Qui avviene la degassificazione e la decomposizione della materia organica e dove si generano un gas di pirolisi e un residuo solido. Nella parte anteriore del forno, le lame di sollevamento, disposte in ordine inverso, forniscono il miglior possibile contatto superficiale tra i rifiuti e la superficie della parete del forno senza aumentare la formazione di polveri

agitando i rifiuti. La velocità del forno rotante e il tempo di permanenza del materiale all'interno del forno possono essere impostati con un range tra 30 minuti a 2 ore. Questo tempo di permanenza garantisce un residuo inerte privo di composti organici, solo con una piccola quantità di puro carbonio. Circa metà degli inquinanti gassosi si sono formati durante il processo di pirolisi, come l'idrogeno, il cloruro, l'acido fluoridrico e dei composti solforati che reagiscono già all'interno del forno rotante con la calce viva aggiunta durante l'alimentazione. Perciò il gas di scarico derivante dall'incenerimento dei gas di pirolisi necessita solo di un minimo di pulizia.

I residui solidi del processo di pirolisi vengono rimossi tramite uno scaricatore a umido. Essi, aventi un'umidità residua compresa tra il 30 e il 50 % e una temperatura compresa tra 40 e 50 °C, sono trasportati al silo di residui mediante un nastro trasportatore collegato a ciascuno dei due forni. Direttamente davanti al silo di coke a bassa temperatura si estraggono componenti ferrosi grossolani grazie ad un separatore magnetico. Questi componenti costituiscono il 5-10 % dei residui totali di pirolisi. I contenitori pieni di char e polveri di cicloni vengono poi trasportati alla discarica di coke di pirolisi della contea vicino all'impianto di pirolisi.

Il syngas generato durante la degassificazione viene trasportato dall'estremità superiore dell'alloggiamento di scarico dei cicloni a gas caldo in cui avviene la depolverazione. L'efficienza dei cicloni è di circa il 70%, che equivale ad una rimozione di circa 80-100 kg di polvere per ora. La polvere separata, che ha una temperatura di circa 450 °C, viene scaricata attraverso le doppie alette a pendolo e aggiunte al coke mediante trasportatori di raffreddamento a coclea. I cicloni vengono puliti per togliere le polveri sottili ad intervalli di circa quattro ore. Per evitare la condensazione tutte le componenti contenenti gas, compresi i cicloni, vengono riscaldati elettricamente.

Il gas di pirolisi pretrattato dei due forni rotanti viene estratto e caricato sulla camera di combustione in cui è incenerito con un eccesso di aria di circa 5-8 %, ad una temperatura di 1.200 °C. Il gas effluente contiene solo piccole quantità di monossido di carbonio, diossine, furani e idrocarburi ed è richiesto solo un semplice trattamento di questi per la loro diminuzione. Una parte del gas effluente dalla camera di combustione viene utilizzato per la prima volta per il riscaldamento del forno rotante. Invece, il gas residuo così come il gas di riscaldamento ricircolato, raffreddato tra i 600 e i 650 °C, sono usati per alimentare una caldaia di calore di scarto. In essa, il vapore a 25 bar e 350 °C è generato dal calore del gas di combustione e successivamente immesso in una turbina-generatore per la generazione di energia. Per ridurre il contenuto di Nox negli effluenti gassosi si utilizza una denitrificazione SNCR. Quindi una soluzione di urea viene aggiunta tramite ugelli raffreddati ad acqua al gas di scarico caldo tra camera di combustione e caldaia. A quella temperatura l'urea degenera in ammoniaca che con i nitrati generano azoto molecolare e acqua, quindi i valori scendono al di sotto dei limiti richiesti. Per ridurre la quantità di aria di combustione e quindi l'emissione di

Nox, circa 5.000 m<sup>3</sup> di gas di combustione trattati vengono trasferiti alla camera di combustione da un ventilatore. Il gas di combustione, raffreddato a 200 °C nella caldaia, viene spolverato in un filtro a tessuto. Aggiungendo una miscela di bicarbonato di sodio e carbone attivo a monte, i restanti inquinanti gassosi e il mercurio vengono assorbiti e adsorbiti. Questa semplice tecnica garantisce il rispetto dei limiti di emissione. Grazie alla calce viva che viene messa nel forno rotante e del conseguente legame parziale di gas inquinanti, i valori dei gas di combustione per gli inquinanti sono inferiori a quelli dei sistemi convenzionali. A causa della maggiore reattività di base del bicarbonato di sodio rispetto ad altri reagenti, è sufficiente una piccola quantità per scendere al di sotto dei valori limite richiesti.

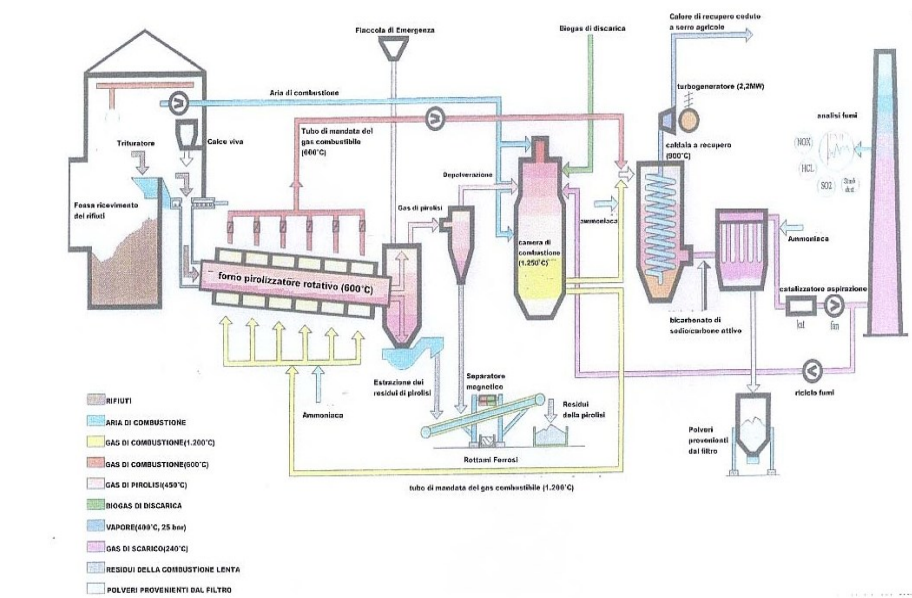


Figura 2, schema d'impianto Burgau

Area di stoccaggio dei rifiuti	Contea di Günzburg, 762 m <sup>2</sup>
Numero di abitanti	120,000
Quantità di rifiuti	35,000 t/a
Tipologia di rifiuti	Rifiuti domestici residui Rifiuti da attività commerciali Rifiuti ingombranti (bulky waste) Fanghi di depurazione
Valore calorico dei rifiuti	Medio 9,000 kJ/kg

	Massimo	11,000 kJ/kg
	Minimo	6,000 kJ/kg
Analisi discreta dei rifiuti	Misto	25 %
	Frazione inorganica	30 %
	Frazione organica	45 %

Numero di forni rotanti	2
Dimensioni dei forni rotanti -diametro della struttura interna -lunghezza della struttura riscaldata	2.2 m 21 m
Temperatura dei gas di scarico nella camera di combustione	1,200 °C
Temperatura dei gas di scarico a monte della caldaia	900 °C
Temperatura dei gas di scarico a valle della caldaia	200 °C
Parametri del vapore -temperatura -pressione	350 °C 2,5 MPa
Potenza generata	2.2 MW max
Tipo di turbina	Condensazione
Recupero di calore	Recupero tramite condensazione e fornitura di acqua calda per le greenhouses nel quartiere
Emissioni in termini di valor medio (1997)  -polveri -acido cloridrico -anidride solforosa	Tra parentesi i limiti normativi normalizzati a 0°C, 1013 mbar e 11% O2 1.8 mg/m <sup>3</sup> (10 mg/m <sup>3</sup> ) 5.5 mg/m <sup>3</sup> (10 mg/m <sup>3</sup> ) 8.0 mg/m <sup>3</sup> (50 mg/m <sup>3</sup> )

## 2.3- Hamm-Uentrop

### 2.3.1 Descrizione impianto

L'impianto è stato progettato per essere operativo 8000 ore all'anno. L'impianto di Hamm è gestito da Trianel utilizzando un software specializzato basato su algoritmi di ottimizzazione stocastica che hanno contribuito a migliorare il margine di profitto.

L'impianto di Hamm-Uentrop è composto da due forni di pirolisi a tamburo rotante da 13,300 kg/h di capacità e un trattamento annuo di 100,000 t/h. Esso tratta rifiuti solidi urbani differenziati, RSU

industriali e commerciali differenziati e residui dalla demolizione di automobili. Grazie al loro elevato potere calorifico, l'impianto produce 7,200 Nm<sup>3</sup>/h di pyrogas utilizzato per il processo di riscaldamento dei forni e per la produzione di vapore che, con la combustione del pyrocoke, costituiscono una potenza termica netta di circa 260 GJ/h che viene successivamente convertita in una turbina a vapore.

Il cambiamento dei mercati dell'energia, soprattutto in Europa, sta portando a nuovi profili operativi con maggiori requisiti di flessibilità per molte centrali elettriche fossili. Di conseguenza, Trianel sta adattando la centrale a ciclo combinato Hamm-Uentrop alle condizioni del mercato tedesco. I miglioramenti tecnici che sono stati attuati si stanno già dimostrando utili oggi, ma la loro importanza dovrebbe aumentare ulteriormente.

Data inizio attività	2001
Quantità di rifiuti	100,000 t/a
Tipologia di rifiuti	Combustibili da raccolta differenziata -plastiche leggere 30% -frazioni leggere da R.D. 15% -frazione RSU da selezione meccanica 30% -scarti combustibili industriali 10% -vari da attività commerciali 15%
Potere calorifico medio	18,100 kJ/kg
Composizione media	-umidità 13% -materiale volatile 61% -incombustibile 26%

Numero di trituratori	3
Reattori rotativi	
-numero di reattori	2
-portata	6.65 t/h cadauno
-velocità di rotazione	90 g/h
-dimensioni del reattore	2,8 m x 20 m
-tempo di permanenza	90 min
-temperatura dei fumi in camicia	750 °C
Prodotti del processo	
-pyrogas	9,300 kg/h
-pyrocoke	2,500 kg/h
-metalli ferrosi	350 kg/h
-metalli non ferrosi	250 kg/h
-inerti (vetri e ceramiche)	170 kg/h

#### 2.4- Differenze e similitudini Burgau e Hamm-Uentrop

I due impianti sopra illustrati hanno in comune un paio di cose: sono situati in Germania e utilizzato il processo di pirolisi per obiettivi in larga scala. La parte interessante viene fuori parlando delle loro differenze. Burgau utilizza la pirolisi per lo smaltimento di rifiuti di diverso genere, ovvero RSU, bulky waste e fanghi di depurazione; Hamm-Uentrop, pur sempre usando la pirolisi come processo principale, ha come obiettivo quello di generare energia che arriva al valore di 260 GJ/h partendo dalla potenza termica e convertita da una turbina a vapore.

	<b>BURGAU</b>	<b>HAMM-UENTROP</b>
Quantità di rifiuti smaltiti	35,000 t/a	100,000 t/a
Tipologia di rifiuti	Rifiuti domestici residui, rifiuti da attività commerciali, rifiuti ingombranti e fanghi di depurazione	plastiche leggere, frazioni leggere da R.D., frazioni rifiuti solidi urbani da selezione meccanica, scarti combustibili industriali e vari da attività commerciali
Potere calorifico medio	9,000 kJ/kg	18,100 kJ/kg
Numero di forni	2	2
Grandezze -dimensioni -temperatura dei gas di combustione	.2 m x 21 m (forno) 1250 °C	2,8 m x 20 m (reattore) 1200 °C
Prodotti risultanti -quantità -tipologia	250-300 kg/t di rifiuto pyrocoke composto in media da: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 11% SiO <sub>2</sub> 39% CaO 7% FeO 5% Carbonio 26% Anioni (solfati, carbonati, ecc) 10%	12570 kg/h totali pyrogas, pyrocoke, metalli ferrosi e non ferrosi, inerti. In kg/h: pyrogas 9300 Pyrocoke 2500 Metalli ferrosi 350 Metalli non ferrosi 250 Inerti 170
Obiettivo	Smaltimento dei rifiuti	Ottenimento di Energia termica



## 2.5- Piromak

### 2.5.1 Breve descrizione storica

La Piromak TD S.r.l. è un'azienda che progetta e realizza impianti di produzione di energia e cogenerazione, impianti per lo sfruttamento degli scarti di lavorazione e dei rifiuti, impianti per la produzione di idrocarburi e gas tramite lo sfruttamento delle biomasse e tutte le macchine di supporto come caricatori, abbattitori di particolato di vario genere, miscelatori e apparecchiature per il trattamento dei fanghi.

La Piromak TD S.r.l. partì da un'idea di Domenico Tanfoglio che nel 1973, dopo la crisi petrolifera, cominciò a cercare alternative al petrolio. Passando prima per una bricchettatrice, ovvero una macchina che serve per pressare la segatura e farne legna da ardere, si arriva al 1980 in cui ebbe grande successo con il Gasogeno, denominato BCS, poiché era l'unico che non contrastava la vecchia legge 203. Esso era l'unico termovalorizzatore autorizzato e diede inizio alla costruzione di migliaia di apparecchiature simili nel mondo per risolvere il problema dei rifiuti tossici e dei rifiuti nocivi. La grande novità della Piromak è il Pirodistilgasogeno o PDG, ovvero un impianto che consente la produzione di alcool metilico  $\text{CH}_3\text{OH}$ .

### Pirodistilgasogeno



*Figura 3, pirodistilgasogeno*

Il PDG è composto principalmente da un reattore di pirolisi e da altre macchine di supporto per il funzionamento automatizzato dell'impianto che insieme consentono un'ottima chiusura del ciclo di vita dei prodotti organici. La parte del reattore è composta da speciali tubi metallici, chiamati tubi fusori, che trasportano il materiale organico e disgregano le molecole grazie all'elevata temperatura.

Il calore necessario per la pirolisi viene dal disgregatore combustibili solidi (DCS) che svolge una combustione stechiometrica completa di materiali organici dosati in modo automatico da un caricatore.

La sua fiamma attraversa un catalizzatore chiamato Cubo CIT, ovvero catalizzatore agli ioni di titanio, che ossida tutti i residui di combustione incompleta e reindirizza la fiamma e i fumi caldi verso il forno. Questi ultimi verranno posti in un sistema di lavaggio fumi che cattura fino alle particelle più fini di particolato tramite uno speciale filtro a rete idraulica. Il gas prodotto attraversa un condensatore che li raffredda e li separa dalla parte condensabile (synoil) che successivamente sarà raccolta in un serbatoio. La parte gassosa rimanente viene stoccata in un sistema di accumulo e la frazione solida prodotta è composta da carbone e da materiale metallico che, se presente, viene separato dal carbone tramite un nastro magnetico.

Il Pirodistilgasogeno ha vari impieghi:

- trattamento dei rifiuti solidi urbani
- trattamento dei rifiuti ospedalieri
- trattamento dei rifiuti residuali
- biomassa
- pneumatici
- plastica
- trattamento di scarti di macelleria
- trattamento di fanghi organici

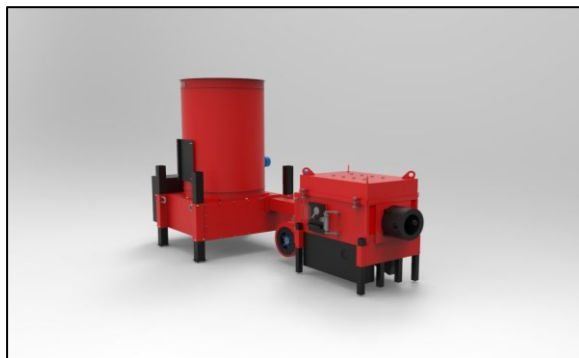
Alcuni esempi dei possibili prodotti:

	GOMMA	PLASTICA
Metalli	7%	-
Syngas	23%	40%
Synoil	35%	60%
Carbone	35%	-

Caratteristiche specifiche della pirolisi degli pneumatici fuori uso:

Metalli	Recupero di metalli ed altre materie prime, completamente puliti
Syngas	Gas di sintesi con PCI 8000-9500 kcal/kg
Synoil	Olio di sintesi con PCI 8000-10500 kcal/kg
Carbone	PCI 6000-8000 kcal/kg

### Disgregatore combustibili solidi



*Figura 4, Disgregatore*

Piomak ha costruito un bruciatore a griglia fissa che disgrega materiali organici tramite pirolisi per ottenere energia termica per processi industriali. Il cosiddetto disgregatore combustibili solidi, o DCS, è completamente automatico e viene alimentato a combustibili solidi organici di qualsiasi tipo, passando da biomassa vegetale o animale a carta, pneumatici e rifiuti dell'industria tessile che di per sé non hanno alcun valore apparente. Il suo elevato rendimento permette di sfruttare tutto il potere calorifico dei materiali organici in entrata tale da ottenere un livello di energia termica dell'ordine di 1200-1500 °C. Lo scopo principale del DCS è collaborare con caldaie e scambiatori a recupero e in contatto diretto per calore di processo oppure può essere una valida opzione al posto di bruciatori alimentati a idrocarburi, gas metano, propano e GPL. Il valore aggiunto di questo disgregatore è la sua capacità di decomporre catene molto lunghe e complesse con l'obiettivo di sfruttare il loro potere calorifico riducendo al minimo la quantità di ceneri prodotte. L'unico parametro richiesto al combustibile solido prima che entri nel bruciatore è una sua triturazione e umidità poco elevata con valori che non devono superare i 5 centimetri per la pezzatura massima del materiale e 35% per

l'umidità massima. Il DCS si divide in circa 20 modelli in base alla potenza termica che variano per fumi in kg/h, peso, lunghezza ed energia prodotta.

Esempio di prodotti generati da Legno secco e da Rifiuti solidi urbani:

	LEGNO SECCO	RSU
METALLI	-	5%
SYNGAS	60%	20%
SYNOIL	15%	40% con acqua
CARBONE	25%	35%

## 2.6-Pirolisi per la pulizia di lattine in alluminio

Dopo aver mostrato come la pirolisi possa essere utilizzata per smaltire i rifiuti, per ricavare energia termica da matrici che sarebbero andate in discarica e per l'alimentazione di impianti di combustione o di altro genere, descrivo un altro utilizzo di questo processo: la pulizia.

A Friburgo, Germania, l'azienda Piralag tratta i rifiuti organici contenenti alluminio come lattine, barattoli, tubi, imballaggi e altro avendo in mente vari obiettivi:

- utilizzo termico dei composti organici attaccati ai metalli
- recupero di materiali metallici senza ossidazione
- generazione di energia elettrica da calore prodotto internamente tramite vapore
- produzione di leghe di alluminio nella fonderia in diverse forme.

La parte organica rimasta nei rifiuti supporta il processo di pirolisi generando energia termica grazie al suo elevato potere calorifico. Piralag pulisce i metalli utilizzando plastica e altre sostanze organiche come combustibile per riscaldare il tamburo rotante che permette, tramite il calore generato a 400-500 °C in un'operazione continua grazie ad un sistema periferico e ad un monitoraggio digitale di 24/24 ore, di vaporizzare i contaminanti organici rimanenti nel metallo. Il materiale metallico pulito viene trasportato direttamente nei silos o nella fonderia interna che lo trasforma in alluminio liquido così che si possa mallearlo a proprio piacimento

### **3-CONNESSIONI TRA TECNOLOGIE E MATRICI PIROLIZZABILI**

#### 3.1- Matrici entranti in impianto

Tabella descrittiva dei materiali entranti negli impianti sopra elencati:

	BURGAU	HAMM- UENTROP	PIROMAK	PYRALAG
Rifiuti solidi urbani	Sì	Sì	Sì	Sì
Fanghi civili e industriali	Sì	No	Sì	No
Plastiche	Sì	Sì	Sì	Sì
Rifiuti ospedalieri	No	No	Sì	No
Metalli	No	Sì	Sì	Sì
Pneumatici	No	No	Sì	No

#### 3.2- Connessione tra matrici entranti, tecnologia utilizzata e obiettivo

Matrici: Rsu, fanghi, plastiche, metalli vari, Raee, plasmix, biomasse

Tecnologie: Burgau, Hamm-Uentrop, Piromak, Piralag

Obiettivi: smaltimento, energia termica, pulizia metalli, recupero metalli, recupero syngas

In questo capitolo spiego come matrici, tecnologie e obiettivi siano inevitabilmente collegati tra loro: scelta una tecnologia e le matrici entranti, si possono scegliere solo alcuni obiettivi e, posto un obiettivo, si deve usare una certa tecnologia con solo alcune matrici entranti.

L'impianto di pirolisi di Burgau ha come principale obiettivo lo smaltimento dei rifiuti e accetta in trattamento diverse matrici, come gli Rsu, i fanghi di depurazione e alcune plastiche, ma non può trattare i metalli, le gomme (es: pneumatici) e rifiuti pericolosi come rifiuti ospedalieri e pile usurate. Il processo di pirolisi dei materiali di scarto avviene in due forni rotativi riscaldati indirettamente. I forni hanno una lunghezza (da riscaldati) di circa 20 metri e un diametro interno di circa 2,2 metri. I due forni rotativi sono riscaldati indirettamente con gas di combustione dal gas di pirolisi con una temperatura di 1.200 °C. Il gas effluente è condotto intorno ai gusci del forno tramite una muffola stazionaria e si raffredda fino a circa 600-650 °C alla sua uscita. Da questo processo non si hanno grandi quantità risultanti poiché l'obiettivo è lo smaltimento, però il calore prodotto in eccesso viene riutilizzato nell'impianto.

Hamm-Uentrop aveva sia obiettivo che prodotti risultanti diversi e ciò era possibile grazie al trattamento di plastiche leggere che giocavano un ruolo primario nel raddoppiamento complessivo del potere calorifico medio delle matrici entranti rispetto all'impianto di Burgau (18,100 per Hamm e 9000 kJ/kg per Burgau). Grazie al grande quantitativo di syngas prodotto, l'obiettivo di generare energia termica per 100,000 abitanti era più che possibile.

La Piromak ha due principali tecnologie, il PDG e il DCS, con vari obiettivi che si differenziano particolarmente dai due impianti precedentemente descritti. Il PDG ha vari impieghi: trattamento dei rifiuti solidi urbani, dei rifiuti ospedalieri, di biomassa, pneumatici, plastica, ecc. Ogni processo varia per prodotti risultanti e matrici utilizzate, non può essere semplificato come impianto a senso unico. Il DCS ha un obiettivo più semplice, ovvero quello di generare energia per mantenere in funzione altri impianti o per unicamente disgregare le matrici in frazioni più piccole. Ciò porta questa tecnologia ad avere come risultante maggiore la frazione gassosa.

Le matrici entranti dell'impianto di pulizia tramite pirolisi della Pyralag sono i rifiuti contenenti metalli, come lattine, barattoli, tubi e imballaggi vari. Le frazioni risultanti per la maggiore sono il syngas e gli "inerti" che, in questo caso, hanno un ruolo di maggiore rilevanza in quanto sono principalmente alluminio ripulito dai contaminanti organici che precedentemente aveva.

#### 4-IMPATTI AMBIENTALI

Come precedentemente visto dalla connessione tra le matrici entranti e la tecnologia usata, il prodotto uscente può variare in base alle possibili combinazioni delle due variabili. Allo stesso modo, le rese e gli impatti ambientali sono piuttosto differenti tra loro. L'obiettivo dell'impianto di Burgau è lo smaltimento di rifiuti e per questo non si hanno rese dei materiali prodotti. D'altro canto, grazie ai 2 forni ed alle matrici in entrata, esso riesce a generare al massimo una potenza pari a 2.2 MW e ricava energia termica tramite condensazione per riutilizzarla nel processo e contribuisce alla fornitura di acqua calda per le greenhouse nel quartiere. L'impianto di Burgau non ha impatti ambientali molto pesanti e ciò lo dimostra una tabella di emissioni dichiarate e che le confronta con Compact Power, Bristol, UK, (valori di Brochure)

Throughput: 6t/h

Heating value: 8000 kJ/kg

Flue gas amount: 30,000 Nm<sup>3</sup>/h

Guaranteed limiting values of the emission according 17.BimSchV<sup>2</sup>related to 11% O<sub>2</sub> and dry flue gas

Emission of flue gas	Measured value Burgau mg/Sm <sup>3</sup>	Compact Power brochure values	Daily mean value limiting value according to 17.BimSchV <sup>2</sup> mg/Nm <sup>3</sup>
----------------------	---	----------------------------------	--

*Continuous measurements*

Carbon monoxide	10	[Trace]	50
Total dust	2	[0.2]	10
Organic matter as total C	2	[Trace]	10
Gaseous inorganic chlorine – compounds, declared as HCl	5	[2]	10

Gaseous inorganic fluorine – compounds, declared as HF	0.5	[0.1]	1
Sulphur dioxide and sulphur trioxide, as SO <sub>2</sub>	20	[25]	50
Nitrogen monoxide and nitrogen dioxide as NO <sub>2</sub>	180	[<37]	200-
<i>Individual measurements</i>			
Total Cd, Ti	0.01	[0.006]	0.05
Total Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V	0.1	[0.006]	0.5
PCDD/PCDF (TEQ-Value) dioxin	0.002 ng/Nm <sup>3</sup>	[0.003]	0.1 ng/Nm <sup>3</sup>

*Figura 5, Brochure emissioni Burgau*

Uno dei motivi principali che spiegano questi valori è che le matrici all'interno passano attraverso diversi cicloni e altri macchinari in cui il loro volume viene diminuito e i materiali solidi pericolosi vengono trasportati in contenitori appositi per un loro successivo ulteriore trattamento (es: invio a raffinerie).

La pirolisi di Hamm-Uentrop era probabilmente caratterizzata da temperature superiori ai 650-700 °C con tempi di contatto molto rapidi per favorire la produzione di syngas che porta a generare elevate quantità di energia termica, ulteriormente facilitata dall'elevato potere calorifico delle matrici entranti, in particolare delle plastiche leggere. Nel 2009 avvenne un incidente all'impianto di pirolisi situata nella città tedesca in cui esso bruciò per problemi progettuali e per cui ora non si trovano alcuni dati sugli impatti ambientali che avrebbe portato.

Il Pirodistilgasogeno della Piromak può essere utilizzato per vari scopi e può trattare varie tipologie di matrici. Per questo motivo, sia rese che impatti ambientali non possono essere descritte univocamente. Questa tecnologia utilizza diversi macchinari per la separazione della matrice nelle sue frazioni. Inizialmente è presente un condensatore che ha il compito



di raffreddare in gas prodotto e separarlo dalla parte condensabile, ovvero il synoil che viene trattenuto in un contenitore isolato. Successivamente, il gas incondensabile e una parte del gas condensabile entrano in un ciclone che utilizza la forza centrifuga ed una pala di separazione per contenere il particolato solido in una sezione apposita per il suo stoccaggio. La frazione gassosa rimanente passa in uno scrubber che la priva del liquido e del particolato in eccesso, i quali vengono trattati in un depuratore acque. Fino ad ora, il PDG non rilascia in atmosfera in alcun modo qualsiasi tipo di sostanza pericolosa per l'ambiente poiché dopo ogni passaggio del gas in entrata al successivo macchinario le sostanze potenzialmente impattanti vengono trattenute in appositi contenitori che non permettono una loro fuoriuscita. L'unica parte che porta all'ambiente sostanze pericolose è il motore a combustione interna che è attrezzato di un camino da cui fuoriescono varie sostanze pericolose che dipendono dalle matrici in entrata che però sono minimizzate grazie ai diversi trattamenti che avvengono prima. A tale proposito, si è svolto un test sul DCS con miscele molto difficili da trattare persino da un inceneritore per vedere che emissioni produceva. Il rifiuto da sottoporre a test è classificato come "CER 191211" ed è il risultato finale di varie lavorazioni. Include: plastica (film PE), plastica imballi rigidi (PEHD, PET, PP), stracci (unti d'olio, unti di solvente), cartone (sporco), legno anche trattato (sporco), morchie di vernice. Non sono stati utilizzati altri sistemi di trattamento di emissioni gassose, proprio per vedere cosa emette la linea semplicemente con un ciclone per abbattere le polveri grossolane.

PARAMETRI SULL'EFFLUENTE GASSOSO SECCO NORMALIZZATO 0°C E 1013 mbar
---

PORTATA Met: UNI EN ISO 16911-1:2013	1169±55	Nm <sup>3</sup> /h
OSSIGENO Met: UNI EN 14789:2006	16,06±0,36	% v/v
DIBENZODIOSSINE/FURANI POLICLORURATI (PCDD/PCDF)		

<p>Met: UNI EN 1948-1:2006+UNI EN 1948-2:2006+UNI-EN-1948-3:2006</p> <p>PCDD SOSTITUITE IN 2,3,7,8 PCDF SOSTITUITI IN 2,3,7,8</p> <p>1,2,3,4,6,7,8-eptaCDD</p> <p>1,2,3,4,7,8-esaCDD</p> <p>1,2,3,6,7,8-esaCDF</p> <p>1,2,3,7,8-pentaCDD</p> <p>2,3,4,7,8-pentaCDF</p> <p>2,3,7,8-tetraCDF</p> <p>OctaCDD</p> <p>1,2,3,4,7,8,9-eptaCDF</p> <p>1,2,3,6,7,8-esaCDD</p> <p>1,2,3,7,8,9-esaCDF</p> <p>2,3,4,6,7,8-esaCDF</p> <p>2,3,7,8-tetraCDD</p> <p>Equivalente di tossicità (I-TEQ)</p> <p>1,2,3,4,6,7,8-eptaCDF</p> <p>1,2,3,4,7,8-esaCDF</p> <p>1,2,3,7,8,9-esaCDD</p> <p>1,2,3,7,8-pentaCDF</p> <p>CONGENERI TOSSICI SECONDO OMS</p> <p>OctaCDF</p>	<p>5±1,4</p> <p>4±0,8</p> <p>8±1,6</p> <p>6±1,2</p> <p>9±1,8</p> <p>18±3,6</p> <p>14±2,8</p> <p>21±4,2</p> <p>25±5</p> <p>45±9</p> <p>7±1,2</p> <p>25±5</p> <p>41,9±6,6</p> <p></p> <p>300±60</p> <p>500±100</p> <p>50±5</p> <p></p> <p>41±6,6</p>	<p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p> <p>pg/Nm<sup>3</sup></p>
<p>IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (IPA)</p> <p>Met: DM 25/08/2000 GU n°223 23/09/2000</p> <p>ALL 3</p> <p>Dibenzo (a, h) pirene</p> <p>Dibenzo (a, h) antracene</p> <p>Benzo (a) antracene</p> <p>Benzo (b) fluorantene</p> <p>Benzo (j) fluorantene</p>	<p>&lt;RL</p>	<p>ng/Nm<sup>3</sup></p>

Benzo (k) fluorantene Modello 1113/SQ rev. 6		
---	--	--

Tabella di emissioni in atmosfera camino E1-Campionamento effettuato durante la combustione di rifiuti.

Il D.M. 25/02/2000 n. 124, regolamento recante i valori di emissione e le norme tecniche riguardanti le caratteristiche e le condizioni di esercizio degli impianti di incenerimento e di coincenerimento dei rifiuti pericolosi, in attuazione della Direttiva 94/67/CE del Consiglio del 16 dicembre 1994, fissa il valore limite di emissione per policlorodibenzodiossine e policlorodibenzofurani (PCDD/PCDF), che non può essere superiore a:

Limite di legge: 0,1 ng/m<sup>3</sup>, pari a 100 pg/m<sup>3</sup>.

Va confrontato con il dato di "Equivalente di tossicità (ITEQ) CHE VALE 41,9 pg/m<sup>3</sup>.

Per gli IPA addirittura non si è potuta avere lettura, perché sono sotto al limite di rilevamento del sistema.

Tabella sulle emissioni in atmosfera camino E1-campionamento effettuato durante la combustione dei rifiuti dalle ore 10:05 alle 11:05 (durata totale: dalle 8:55 alle 12:15)

PARAMETRI SULL'EFFLUENTE GASSOSO SECCO NORMALIZZATO 0°C E 1013 mbar

PORTATA Met: UNI EN ISO 16911-1:2013	677 ± 49	Nm <sup>3</sup> /h
OSSIGENO Met: UNI EN 14789:2006	14,83 ± 0,35	% v/v
ACIDO FLUORIDRICO Met: DM 25/08/2000 GU N°223 23/09/2000 ALL 2	< RL	mg/Nm <sup>3</sup>

MONOSSIDO DI CARBONIO Met: UNI EN 15058:2006	19,6 ± 9,0	mg/Nm <sup>3</sup>
ACIDO CLORIDRICO Met: DM 25/08/2000 GU N°223 23/09/2000 ALL 2	0,84 ± 0,21	mg/Nm <sup>3</sup>
POLVERI TOTALI Met: UNI EN 13284-1:2013	230 ± 75	mg/Nm <sup>3</sup>
OSSIDI DI AZOTO Met: UNI EN 14792:2006	256,1 ± 5,4	mg/Nm <sup>3</sup>
OSSIDI DI ZOLFO Met: UNI EN 14791:2017	9,0 ± 2,3	mg/Nm <sup>3</sup>
SOSTANZE ORGANICHE VOLATILI Met: UNI EN 12619:2013	17 ± 7	mg/Nm <sup>3</sup>
COMPOSTI ALOGENATI Met: UNI CEN/TS 13649:2015 Diclorodifluorometano Triclorodifluorometano	<RL	mg/Nm <sup>3</sup>

Dalla Gazzetta Ufficiale, Art. 27 - Modifiche agli allegati alla Parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152:

#### VALORI LIMITE DI EMISSIONE IN ATMOSFERA

Valori limite di emissione medi giornalieri espressi in mg/Nm<sup>3</sup>:

Polvere totale	10
Sostanze organiche sotto forma di gas e vapori espresse come carbonio organico totale (TOC)	10
Acido cloridrico (HCl)	10
Acido fluoridrico (HF)	1
Biossido di zolfo (SO <sub>2</sub> )	50

Monossido di azoto (NO) e biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) espressi come NO<sub>2</sub> per gli impianti di incenerimento dei rifiuti esistenti dotati di una capacità nominale superiore a 6 t/ora e per i nuovi impianti di incenerimento dei rifiuti 200

Monossido di azoto (NO) e biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) espressi come NO<sub>2</sub> per gli impianti di incenerimento dei rifiuti esistenti con una capacità nominale pari o inferiore a 6 t/ora 400

Monossido di Carbonio (CO) 50

Ammoniaca (NH<sub>3</sub>) 30

Confrontando con i valori misurati solo le “POLVERI TOTALI” e “OSSIDI DI AZOTO” sono fuori limite (LIMITE DI LEGGE: 10 – VALORE MISURATO 34) e questo è

1. abbastanza normale per le POLVERI TOTALI, dato che si è usato solo un ciclone e nessun filtro a maniche o semi assoluto.
2. Da chiarire per gli OSSIDI DI AZOTO, per eventuale abbattimento.

Per “SOSTANZE ORGANICHE VOLATILI (TVOC)” è difficile trovare il corretto limite di legge.

Per i “COMPOSTI ALOGENATI” non si raggiunge la lettura minima, quindi nessun problema.



## 5-FUTURI SVILUPPI

### 5.1-Pirolisi Diffusa come nuovo modello di riferimento per trattamento rifiuti

Come alternativa al trattamento dei rifiuti, un impianto di pirolisi intercetta matrici che tradizionalmente sono destinate alle discariche, agli inceneritori e alle discariche abusive presenti in ambiente che devono essere corrette a carico dei comuni. Il traguardo da raggiungere non è la completa trasformazione di discariche e inceneritori in impianti di pirolisi; al contrario, la soluzione ideale è la costruzione di piccoli o medi impianti diffusi sul territorio in modo da generare tre vantaggi:

- ogni rifiuto è trattato più vicino possibile al produttore che lo ha generato, diminuzione di trasporti, con vantaggi non solo per costi e impatto ambientale, ma anche per un migliore controllo del tracciamento dei rifiuti e riduzione dei possibili reati ambientali connessi ai passaggi di mano dei rifiuti stessi;
- Il “rifiuto come spesa” delle comunità, si trasforma in “risorsa che genera ricchezza e lavoro” per la comunità, e quindi ognuna non solo non cercherà più di esportare i propri rifiuti, ma, al contrario, se li terrà ben stretti per non perdere i vantaggi;
- Riduzione netta dell’impatto ambientale, e quindi diminuzione della ostilità dei cittadini verso gli impianti di trattamento rifiuti.

### 5.2-Pirolisi applicata a settori atipici

#### 5.2.1 Pirolisi come produzione di bio-assorbitori per trattare percolati da discarica

La pirolisi è un processo utilizzabile in svariati modi, in particolare se applicata ad altri trattamenti come reforming, cracking e catalizzatori. I suoi limiti sono la dipendenza dalle matrici più diffuse vicine all’impianto di trattamento e la richiesta dei prodotti risultanti da parte delle raffinerie o aziende varie presenti in zona. Un utilizzo diverso dal classico smaltimento di rifiuti è la produzione di un particolare carbone attivo che adsorbe i percolati e il rimanente viene pirolizzato di nuovo. Esso viene prodotto da un’attivazione

a vapore di microonde con un singolo step, o STMSA, che produce bio char da guscio di plasma di scarto o WPS. L'STMSA ha registrato un gradiente di riscaldamento più elevato e una conversione più elevata (70 C/min e % di peso) di WPS in bio char altamente microporoso. Il MAB è stato poi applicato come biosorbente per il trattamento del percolato di discarica pericoloso (LL) e le prestazioni di adsorbimento sono state confrontate con il carbone attivo commerciale con pH diverso, quantità adsorbente, concentrazioni adsorbite e tempi di contatto diversi. Il MAB ha dimostrato un'elevata capacità di adsorbimento, ottenendo la massima efficienza di adsorbimento a 595 mg/g e il 65 % di eliminazione della domanda chimica di ossigeno (COD) con 0,4 g/l di quantità adsorbente in condizioni di acidità ottimali (pH 2-3) dopo 24 ore di tempo di contatto. Queste analisi descrivono come il carbone attivo può essere utilizzato per smaltire il percolato che altrimenti non si potrebbe per la sua elevata umidità. Il bio char di scarto derivante da diversi processi di pirolisi, al posto di mandarlo in discarica, si potrebbe stoccarlo fino ad avere una quantità tale da poterlo aggiungere nel processo di trattamento di LL con proporzionalità 90% e 10% per adsorbire l'umidità e rendere il percolato trattabile.

### 5.2.2 Pirolisi per trattamento termico di terreni contaminati

Il trattamento pirolitico offre il potenziale per la rapida bonifica dei terreni contaminati. Tuttavia, il ripristino della fertilità del suolo può essere molto variabile, sottolineando la necessità di capire come le condizioni di trattamento influenzano la disintossicazione del suolo e la capacità di sostenere la crescita delle piante. L'american Chemical Society ha un progetto pilota di bonifica pirolitica di terreni contaminati da petrolio greggio utilizzando un reattore a forno rotante alimentato di continuo. Il trattamento a 420 C con soli 15 minuti di tempo di permanenza ha portato a elevate efficienze di rimozione sia per gli idrocarburi petroliferi totali (TPH) (99,9%) che per gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) (94,5%) e ha ripristinato la fertilità a livelli di suolo puliti (cioè, la resa in peso secco della biomassa sativa dopo 21 giorni è aumentata da 3,0 0,3 mg per il terreno contaminato a 8,8 1,1 mg per il terreno trattato che è simile a 9,0 0,7 mg per il suolo non contaminato). I test di vitalità con una linea cellulare epiteliale bronchiale umana hanno mostrato che il trattamento pirolitico ha ottenuto efficacemente la disintossicazione degli



estratti contaminati del suolo. Come previsto, l'efficienza di rimozione di TPH e PAH è aumentata con l'aumento dell'intensità del trattamento (cioè, temperature più elevate e tempi di permanenza più lunghi).

### 5.3-ELITE Ambiente S.r.l. e impianto pilota di Pirogassificazione

ELITE Ambiente S.r.l. è una società di trattamento rifiuti fondata nel 1987 con sede a Grisignano di Zocco e Brendola (VI). È specializzata nel riciclaggio di plastica e metalli, con l'obiettivo di recuperare materie prime secondarie. I loro servizi comprendono la raccolta dei rifiuti pericolosi e non pericolosi, la gestione di un moderno impianto di recupero dei rifiuti con linee di frantumazione, macinazione, lavaggio e pressatura, lo smaltimento dei rifiuti e la bonifica ambientale di suoli inquinati e serbatoi d'olio o gasolio.

Dal 2022, ELITE Ambiente ha avviato un nuovo progetto istituendo un impianto pilota di pirolisi. Questa struttura funge da test per identificare i materiali di scarto adatti che possono essere utilizzati per la produzione di energia elettrica, piuttosto che essere smaltiti in discariche. L'obiettivo principale di questo progetto è quello di valutare l'efficienza e la fattibilità del processo di gassificazione, con particolare attenzione alla valutazione delle emissioni di aria e acqua. I dati presentati nelle pagine seguenti sono ricavati da prove effettuate utilizzando come materia prima i dispositivi di protezione individuale (DPI).

La composizione del DPI è la seguente:

- 65 % Polipropilene (PP) e Polietilene (PE)
- 15% Lattice
- 10% Policarbonato
- 10% Altri



*Figura 6, impianto pilota di pirogassificazione*

### 5.3.1 Descrizione del processo

Il processo di pirolisi prevede l'alimentazione di rifiuti plastici, circa 961.920 tonnellate all'anno, in una camera di gassificazione. La camera, realizzata in acciaio Aisi 304, è suddivisa in quattro sezioni: una zona di carico, una zona di raccolta delle ceneri, una zona intermedia per la gassificazione e una zona superiore per il cracking termocatalitico. La zona di carico garantisce un contenimento ermetico, mentre l'area di raccolta delle ceneri raccoglie i residui. La zona intermedia facilita la reazione di gassificazione, convertendo i rifiuti in gas, e la zona superiore consente il cracking termocatalitico per abbattere le sostanze primarie. Inizialmente, i rifiuti entrano nella zona di gassificazione e raggiungono rapidamente condizioni di reazione ottimali, con una temperatura di circa 800 °C in presenza di aria, mantenuta a un livello substechiometrico per evitare il completo incenerimento dei rifiuti. Il syngas risultante viene scaricato dalla parte superiore della camera, dove si verifica la ripartizione di vapori di idrocarburi pesanti

come catrame e carbone, trasformandoli in componenti syngas come CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Un totale di 19.240 tonnellate all'anno di ceneri residue viene trasportato all'esterno di un contenitore attraverso una coclea d'estrazione. Il syngas prodotto ha un potere calorifico superiore al 90%. Scorre ad una velocità di 700 m<sup>3</sup>/h e ha un potere calorifico di 32,6 MJ/kg (intensità energetica 9 kWh/kg<sub>prodotto</sub>).



*Figura 7, reattore di gassificazione*

Quando il syngas esce dalla zona di cracking termocatalitico, trasporta particolato solido fine costituito da ceneri e tracce di carbone attivo non catalizzato. Queste particelle entrano in due filtri cilindrici paralleli, ciascuno di 2 cm di spessore e con un diametro di 250 mm. Questa sezione è dedicata al filtraggio dei syngas dal gassificatore. I filtri sono costituiti da 18+18 candele di filtrazione ad alta densità, che forniscono un'efficienza del 99,5%. All'interno di questi filtri, il particolato viene separato e precipitato sul fondo. Un sistema chiamato Pulsejet, che utilizza l'insufflazione di nitrogeno ad alta pressione, viene utilizzato per pulire le candele.



*Figura 8, Filtri a Candela*

Un'ulteriore purificazione dei syngas avviene in una coppia di torri di lavaggio e scrubber Venturi. Nel primo scrubber, il syngas viene miscelato con una soluzione di acido solforico ( $H_2SO_4$ ) per abbattere l'ammoniaca ( $NH_4$ ). Poi entra nella prima torre di lavaggio dal basso, dove si muove controcorrente verso un flusso discendente della soluzione reagente. Questo processo elimina il particolato residuo e neutralizza i sali, che si depositano sul fondo della torre. L'acqua utilizzata in questo processo viene purificata e raffreddata in un sistema a circuito chiuso, che ne consente il riutilizzo nella torre di lavaggio. Questo processo di assorbimento e pulizia viene ripetuto in un secondo scrubber Venturi, dove il syngas viene miscelato con una soluzione di soda caustica ( $NaOH$ ) per abbattere l'idrogeno solforato, e una torre di lavaggio più grande per la purificazione del gas di sintesi. Il syngas viene infine scaricato ad una temperatura di  $60\text{ }^{\circ}C$  dopo aver subito processi di purificazione, raffreddamento e recupero dell'acqua.



*Figura 9, scrubber venturi e torri di lavaggio*

Per impedire l'intasamento, un paio di filtri di coalescenza viene utilizzato per rimuovere le particelle liquide come acqua ed olio dal gas. Questi filtri fungono anche da dispositivi di sicurezza, rilevando le differenze di pressione causate dal particolato e attivando un allarme per avvisare gli operatori di eventuali anomalie. Nel complesso, questo sistema di pulizia del gas elimina efficacemente il particolato, neutralizza i sali e scompone i gas nocivi, assicurando che il syngas purificato soddisfi gli standard richiesti.



*Figura 10, filtri a coalescenza*

La portata finale del syngas che entra nel motore è di 5819.616 tonnellate all'anno. Il motore utilizzato in questo sistema è un modello Perkins Engines, con una potenza di 242 kW per ogni processo. Circa il 10% dell'elettricità generata alimenta l'impianto stesso. La portata delle emissioni del motore è di 18379.037 tonnellate all'anno. In caso di anomalie, il syngas viene automaticamente reindirizzato a una torcia di sicurezza esterna, dove viene bruciato temporaneamente fino a ripristinare le condizioni ottimali dell'impianto. In circostanze normali, il gas procede ad alimentare il motore a combustione, che aziona il generatore per produrre elettricità e calore. Il diagramma di flussi a blocchi su base annuale è riportato di seguito. È importante sottolineare la peculiarità del processo di pirolisi, che trasforma un solido in ingresso in un syngas e infine in elettricità. I rifiuti solidi sono principalmente ceneri provenienti dalla camera di combustione, le acque reflue derivano dai depuratori mentre le emissioni di gas provengono dal motore.

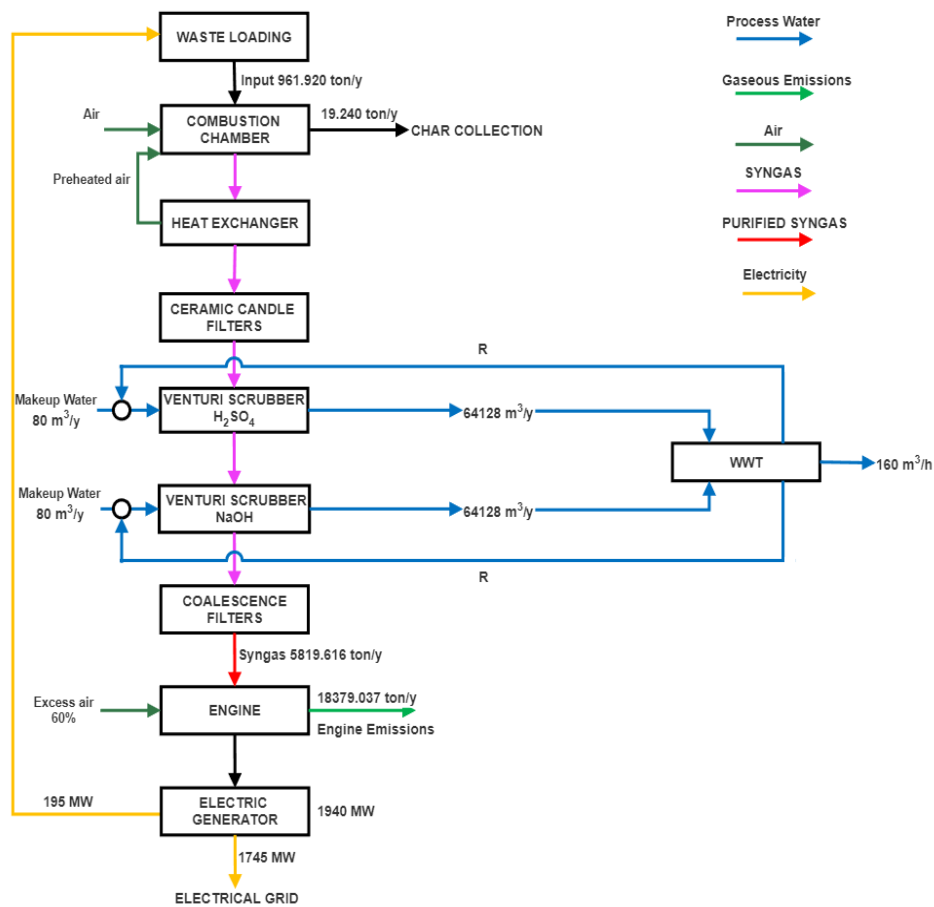


Figura 11, Block flow diagram

### 5.3.2 Environmental Footprints

#### 5.3.2.1 Energy intensity

Energy intensity è l'energia consumata per unità di massa del prodotto in kWh di energia/kg di prodotto calcolata supponendo che il motore produca 1212 kWh per l'intero processo che dura 5 ore:

$$Potenza = \frac{1212kWh}{5h} = 242kW$$

L'impianto utilizza il 10% della potenza prodotta per autosostenere il processo: Auto = 24,24 kW. Abbiamo calcolato l'energia netta prodotta sottraendo la Potenza prodotta con l'energia riutilizzata dall'impianto:

$$Energia = 242 - 24 = 218kW \text{ Netti}$$

L'energia è stata divisa per la massa in entrata per ottenere l'intensità energetica:

$$Energy \text{ Intensity} = \frac{1212kWh}{600kg} = 2,02 \frac{kWh}{kg} \text{ Lordi}$$

Poiché lo scopo dell'impianto analizzato è quello di generare energia da DPI, considerando il potere calorifico dei rifiuti in ingresso si dovrebbe prendere in considerazione un altro valore di intensità energetica, ovvero 9 kWh/kg<sub>prodotto</sub>.

### 5.3.2.2 Water Specific Duty

Il Water specific duty è l'acqua richiesta dall'impianto che scorre dai due scrubber. Il carico specifico dell'acqua per unità in kg di acqua di servizio/ kg di prodotto è stato calcolato per ogni scrubber e quindi sommato. Nel primo scrubber entra una miscela di acqua a 40 °C con idrossido di sodio.

Scrubber H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

$$\rho_{H_2SO_4} \cong 1000 \frac{kg}{m^3} \quad \rho_{water(40^\circ C)} = 992 \text{ kg}/m^3$$

$$\rho_{solution} = 0,99 \cdot 992 + 0,01 \cdot 1000 = 992,08 \text{ kg}/m^3$$

$$8 \frac{m^3}{h} \cdot 992,08 \frac{kg}{m^3} = 7936,64 \frac{kg}{h} \sim 7937 \frac{kg}{h}$$

$$WSD_{H_2SO_4} = \frac{7937 \frac{kg}{h}}{120 \frac{kg}{h}} = 66,14 \frac{kg \text{ water duty}}{kg \text{ of product}}$$

Nel secondo scrubber entra acqua a 40°C con idrossido di sodio.

Scrubber NaOH:

$$\rho_{water(40^\circ C)} = 992 \text{ kg}/m^3 \quad \rho_{NaOH(40^\circ C)} \cong 1030 \text{ kg}/m^3$$

$$\rho_{solution} = 0,99 \cdot 992 + 0,01 \cdot 1030 = 992,38 \text{ kg}/m^3$$



$$8 \frac{m^3}{h} \cdot 992,38 \frac{kg}{m^3} = 7939,04 \frac{kg}{h} \sim 7939 \frac{kg}{h}$$

$$WSD_{NaOH} = \frac{7939 \frac{kg}{h}}{120 \frac{kg}{h}} = 66,159 \frac{kg \text{ water duty}}{kg \text{ di prodotto}}$$

$$WSD_{TOT} = WSD_{NaOH} + WSD_{H_2SO_4} = 132,3 \frac{kg \text{ water duty}}{kg \text{ di prodotto}}$$

### 5.3.2.3 Carbon footprint

Il Carbon footprint è la quantità di anidride carbonica rilasciata nell'atmosfera dall'impianto. Il Carbon Footprint è stato calcolato come unità di carbonio emesse dall'impianto in kg di CO<sub>2equivalente</sub> / kg di prodotto considerando che le emissioni provengono dal motore che ha solo concentrazione di CO in termini di emissioni di carbonio e zero CH<sub>4</sub>.

$$479,788 \frac{kg}{h} \cdot 1 CO_{2eq} = 479,788 \frac{kg_{CO_{2eq}}}{h}$$

Questo risultato è stato diviso per la portata in entrata dei rifiuti (120 kg/h) per ottenere il carbonio scaricato nell'ambiente per unità di massa del prodotto:

$$Carbon \ footprint = \frac{479,788}{120} = 3,99 \frac{kg_{CO_{2eq}}}{kg \text{ di prodotto}} \sim 4 \frac{kg_{CO_{2eq}}}{kg \text{ di prodotto}}$$

### 5.3.2.1.4 Pollutant specific load

La portata totale degli inquinanti è stata calcolata sommando ogni inquinante in uscita dall'impianto in mg/h, poi convertito in kg/h. Descrive la quantità di inquinanti emessi da ogni kg di prodotto.

$$\sum \text{Inquinanti} = 1241695,31 \frac{mg}{h} = 1,24 \frac{kg}{h}$$

Questo risultato è stato diviso per la portata in entrata dei rifiuti (120 kg/h) per ottenere le unità in kg di inquinante emesso dall'impianto per kg di prodotto immesso nell'impianto:

$$PSL = \frac{1,24}{120} = 0,01 \frac{kg \text{ di inquinante}}{kg \text{ di prodotto}}$$

Lo stesso parametro è stato calcolato senza considerare le sostanze organiche volatili:

$$\Sigma \text{ senza SOV} = 1227218,56 \frac{mg}{h} = 1,23 \frac{kg}{h}$$

$$PSL = \frac{1,23}{120} = 0,01 \frac{kg \text{ di inquinante}}{kg \text{ di prodotto}}$$

Inquinante	Valore (mg/h)	Valore (mg/Nm <sup>3</sup> )	Limiti d'emissione DGR 1496/2011
Particolato	3619,19	2,10	10
Metalli	773,82	0,45	
Hg	6,89	0	
HCl	1688,95	0,98	10
Aldeidi	861,71	0,50	
HFl	878,95	0,51	
SOV (espresso come C tot)	58424,03	33,9	150
NO <sub>2</sub>	994414,84	577	450
CO	142354,71	82,6	500
Cd	0	0	
Diossine e furani	74,80	4 × 10 <sup>-8</sup>	
PAH	1716,18	1 × 10 <sup>-3</sup>	
SO <sub>2</sub>	22404,49	13	350
SOV	14476,75	8,4	
Tl	0	0	
Zn	0	0	

Tabella 1: Inquinanti

### 5.3.3 Trattamenti

#### 5.3.3.1 Trattamento per i gas

Composto	%v/v	kg/h
O <sub>2</sub>	5.61	138.077
CO <sub>2</sub>	14.17	479.788
N <sub>2</sub>	73.19	1577.447
H <sub>2</sub> O	7.03	97.476
NH <sub>3</sub>	0.0005	0.007

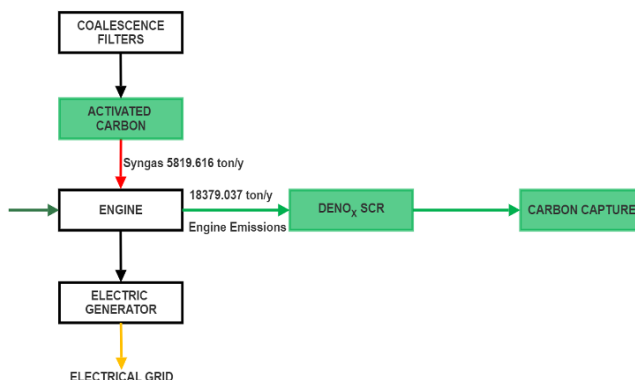


Figura 8: Trattamento aria

Tabella 2: Composizione delle emissioni del motore

In termini di emissioni atmosferiche, il processo si concentra sulla purificazione dei syngas allo scopo di alimentare un motore. Di conseguenza, i gas prodotti durante la pirolisi della plastica non vengono rilasciati nell'ambiente ma vengono invece sottoposti a un processo di pulizia. Questo processo di pulizia è progettato per ottenere la composizione desiderata del syngas, assicurando che possa alimentare efficacemente il motore e generare elettricità. Le uniche emissioni di gas di scarico che richiedono un monitoraggio sono quelle derivanti dalla combustione del syngas. Sulla base dei dati sulle emissioni riportati nella tabella 1, è evidente che l'unico inquinante che supera il limite di emissione fissato dalla DGR 1496/2011 è l'NO<sub>2</sub>, che registra un valore di 577

mg/Nm<sup>3</sup>. Per affrontare questo problema, ho scelto la tecnologia di riduzione catalitica selettiva (SCR) per ridurre la concentrazione di NO<sub>2</sub>. SCR comporta l'iniezione di una soluzione di urea o ammoniacale nel flusso di gas. Queste soluzioni sono tipicamente a concentrazioni rispettivamente del 33-40% e del 25%. Per prestazioni ottimali, è preferibile effettuare l'iniezione a temperature comprese tra 300 e 400 °C. I catalizzatori utilizzati nel processo SCR coinvolgono vari materiali ceramici porosi, come l'ossido di titanio, utilizzati come supporto e i componenti catalitici attivi, che di solito sono comuni ossidi metallici, come vanadio, molibdeno e tungsteno, zeoliti o anche vari metalli preziosi. Il monitoraggio e la manutenzione regolari del sistema SCR, compresa la sostituzione periodica del catalizzatore, sono essenziali per garantire la sua continua efficacia nella riduzione delle emissioni di NO<sub>x</sub>. Un ulteriore trattamento è l'uso della tecnologia a carbone attivo per l'adsorbimento, finalizzato alla rimozione di diossine e furani.

Anche se attualmente i loro livelli sono al di sotto degli standard di emissione, è importante riconoscere che man mano che l'impianto continua ad evolversi e i materiali in ingresso non sono ancora completamente determinati, la gassificazione del PVC (o di qualsiasi altra plastica contenente cloro) potrebbe potenzialmente portare alla formazione di diossine e furani, solitamente presenti in quantità in tracce ma estremamente tossici. Pertanto, l'implementazione della tecnologia a carbone attivo serve come misura precauzionale per affrontare questo potenziale problema.

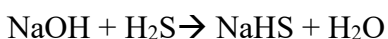
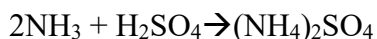
Per migliorare ulteriormente la sostenibilità ambientale e ridurre le emissioni di gas a effetto serra (GHG), si raccomanda l'attuazione di un'unità di cattura di CO<sub>2</sub> post-combustione. A questo proposito, la tecnica scelta è l'assorbimento MEA. La monoetanolamina (MEA) presenta una forte affinità per l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). I gruppi amminici all'interno della MEA reagiscono prontamente con la CO<sub>2</sub>, facilitandone la separazione dal gas di scarico. Attraverso questo processo di assorbimento, la CO<sub>2</sub> viene effettivamente catturata e rimossa dalla MEA. Per un utilizzo efficace, il processo di cattura del carbonio deve essere accoppiato con un'unità di desorbimento. Questa unità facilita il rilascio delle molecole di CO<sub>2</sub> dell'ammina dalla soluzione, permettendo il loro isolamento e uso potenziale. La produzione totale di CO<sub>2</sub> è di 3837,465 ton/anno.

### 5.3.3.2

#### Trattamento delle acque

L'acqua di processo si riferisce all'acqua che entra in contatto con il prodotto di un'attività industriale, come il syngas in questo caso. Pertanto, è essenziale trattare l'acqua di processo in modo appropriato per eliminare gli inquinanti. Nel processo analizzato, le acque reflue sono associate principalmente con unità di assorbimento, comunemente note come scrubber, e in misura minore, con acqua originata dalla condensazione (che è trascurabile in quantità). Nell'impianto vengono utilizzate due soluzioni per la depurazione dei syngas mediante la rimozione degli inquinanti. Una soluzione acida viene utilizzata per eliminare NH<sub>3</sub> (ammoniaca), mentre una soluzione di base viene impiegata per rimuovere H<sub>2</sub>S (acido solfidrico). Entrambe le soluzioni sono costituite da 99% acqua (% w/ w) e 1% reagente (% w/ w), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e NaOH rispettivamente. Dopo il trattamento, che viene effettuato all'interno dell'impianto, entrambe le soluzioni vengono riciclate negli scrubber. Tuttavia, una piccola percentuale di questi non può essere riutilizzata e quindi richiede un'aggiunta d'acqua per compensare la porzione che non può essere riciclata. Nel metodo suggerito, sono coinvolti tre passaggi chiave per raggiungere la corretta composizione dell'acqua: la precipitazione dei sali e la regolazione del pH, seguita dal reagente per ottenere la concentrazione desiderata (1% (p/p) di H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e NaOH).

- Precipitazione dei sali: questa fase comporta la precipitazione dei sali dalla soluzione. Può essere raggiunto attraverso varie tecniche come reazioni chimiche o processi fisici, a seconda dei sali specifici presenti. I sali precipitati vengono quindi separati dalla soluzione, consentendo la loro rimozione e smaltimento.



- Regolazione del pH: la regolazione del pH viene eseguita per controllare l'acidità o l'alcalinità della soluzione. In questo caso, è necessario regolare il pH al livello desiderato. Questo può essere fatto aggiungendo sostanze chimiche o reagenti adatti per aumentare o diminuire il valore del pH.

- Reagenti: una volta che i sali sono precipitati e il pH regolato, il passo successivo è quello di preparare la soluzione del reagente con la concentrazione desiderata di 1% (p/p) di H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e NaOH. Ciò comporta una misurazione accurata e l'aggiunta di quantità appropriate di reagenti per raggiungere la concentrazione desiderata.

## 6-VISIONE ECONOMICA DELLA PIROLISI

Un impianto di pirolisi può avere vari obiettivi sociologici e ambientali, come detto in precedenza, e ognuno ha potenzialmente lo stesso tipo di visione economica. I ricavi generati dall'impianto sono:

-tariffa di conferimento del rifiuto: il produttore che li conferisce deve pagare il servizio di ricevimento, stoccaggio e, in caso servisse, smaltimento delle matrici in base alla quantità di tonnellate consegnate e al tipo di matrice;

-vendita di prodotti finali: si possono ottenere combustibili o miscele di idrocarburi liquidi e solidi vendibili tal quali, si possono raffinare ulteriormente, bruciarli per trasformarli in energia termica da vendere o da riutilizzare, oppure si possono direttamente utilizzare come combustibili per generare energia elettrica per motori dell'impianto;

-matrice solida residua: può avere valore economico, dipende dalla matrice di partenza. La sua importanza varia in base alla zona di produzione, ovvero da quanta richiesta può avere e da quali aziende sono presenti.

Per comprendere meglio il primo punto di ricavo descrivo in modo più accurato il bilancio del conferimento che porta guadagni in diversi ambiti. Se una certa matrice era usualmente conferita in discarica o inceneritore per la sua pericolosità e mancanza di possibilità di trattamenti, l'azienda di stoccaggio o il produttore dovevano versare una certa tariffa di smaltimento e trasporto. L'azienda con un impianto di pirolisi può ricevere quella matrice ad un prezzo inferiore a quello dettato da inceneritori e discariche grazie al fatto che riesce a trasformare la massa di rifiuto ricevuta in parte in materia prima seconda, o MPS, in parte in energia termica e/o energia elettrica lasciando soltanto una piccola frazione irrecuperabile di massa rispetto alla totale ricevuta, quindi da mandare in discarica o in incenerimento.

Un punto molto importante da considerare per avere maggiori ricavi con un impianto di pirolisi è la zona in cui risiede l'azienda. Un impianto preferirà ricevere le matrici con i volumi più elevati presenti intorno alla sua zona perché le tariffe di smaltimento sono consolidate e si può decidere più facilmente il prezzo di conferimento. D'altra parte, dalla conoscenza del processo che posso condurre, data la particolare

tecnologia adottata, per le varie matrici potenziali, so che l'impianto avrà certe rese tecniche in massa, con certi bilanci in energia (ceduta per pirolizzare e riguadagnata sui prodotti finali), e quindi posso aspettarmi ben determinati "output" sia come bilanci di massa che come bilanci di energia. L'ottimizzazione del ciclo economico impone una buona valutazione di cosa e a chi si può vendere che è attorno al luogo dell'impianto. Riassumendo, alla fine del processo ottengo due prodotti trasformabili in energia termica o energia elettrica che possono essere rimessi in impianto di pirolisi per il suo funzionamento oppure venduti a impianti a combustione interna o esterna come il ciclo Rankine a vapore e il ciclo Otto o Diesel.

Come tutti gli impianti, quello di pirolisi non produce solo ricavi, ma anche costi:

- costi di investimento e relativi oneri finanziari;
- costo di autorizzazione e costo per il rispetto delle normative;
- costi di gestione diretta e di gestione indiretta;
- costi ambientali e di smaltimento dei rifiuti generati non riutilizzabili o vendibili.



## 7-LATI NEGATIVI E OBIEZIONI RIGUARDO LA PIROLISI

La ricerca bibliografica non ha portato a trovare articoli apertamente contrari all'utilizzo della pirolisi in un impianto, tranne uno che ne sottolinea l'inefficienza nell'ambito energetico. Citando quest'ultimo, scritto da Andrew Neil Rollinson e Jumoke Mojisola Oladejo (PhD in Tecnologie energetiche dell'Università di Nottingham Ningbo, Cina): "Utilizzando la letteratura e i metodi di studio dei casi, insieme alle applicazioni di permessi civili e ai risultati sperimentali, mostra che un impianto di pirolisi per l'energia autosufficiente dai rifiuti è termodinamicamente non testato, praticamente implausibile e non funzionante dal punto di vista ambientale. Viene inoltre individuato un collegamento tra fallimenti commerciali diffusi e mancanza di attenzione ai fondamenti termodinamici, insieme ad un ambiente di indifferenza o ignoranza nei confronti degli equilibri energetici e della sostenibilità quando queste tecnologie sono presentate, valutate e finanziate." Andrew e Jumoke dimostrano scientificamente come la pirolisi non sia accettabile nell'ambito energetico. Il processo è in perdita nel bilancio dell'energia e la situazione presenta un rischio elevato per gli investitori che può avere un impatto negativo sulle transizioni sociali verso un futuro più sostenibile. Gli autori continuano con una descrizione ineccepibile sul lato puramente termodinamico: "La pirolisi è uno stadio iniziale in tutti i processi di decomposizione termica, con metodi standard che specificano una temperatura di 550 °C. Tuttavia, il processo non è completo fino a 800 °C. Variazioni nella frazione di catrame, gli oli e i carboni prodotti sono una funzione complessa delle condizioni di pirolisi e delle proprietà delle materie prime dovute alla sintesi secondaria e terziaria. Ricerche approfondite condotte negli ultimi trent'anni hanno dimostrato che, senza catalizzatore, il catrame rimane ancora come contaminante in linea di processo anche a temperature del reattore superiori a 1200 °C:

"Il tasso di cracking termico è tale che sono richieste alte temperature - nell'ordine di 1200 °C (anche a seconda del tempo di residenza ad alta temperatura) - al fine di abbattere abbastanza catrami in modo che il gas combustibile rimanente può essere utilizzato senza problemi in un dispositivo a valle come un motore a gas, una turbina a gas o processi di sintesi catalitica".

Per raggiungere questa temperatura richiede grandi quantità di energia e rende l'ingegneria più costosa. Laddove la pirolisi è proposta come opzione EfW, le fasi aggiuntive di depurazione dei gas sono più numerose e ad alta intensità di energia che riducono ulteriormente l'efficienza e portano invariabilmente all'abbandono. ... Bilanci d'energia modesti e positivi sono stati riportati, ma solamente sotto condizioni impraticabili e insostenibili di:

- quando l'energia necessaria per l'essiccazione è stata tirata fuori dai confini del sistema;
- senza considerare le fondamentali perdite di calore (secondo principio di termodinamica);
- attualizzazione delle energie ausiliarie essenziali per la gestione dell'impianto quali, ma non esclusivamente, depurazione gas, pre-lavorazioni e combustibili supplementari al reattore.

Se non è possibile che un concetto di distruzione dei rifiuti tramite pirolisi funzioni con un'efficienza netta positiva in queste circostanze, allora non è possibile fornire surplus energetico, e quindi è considerato EfW senza l'input di risorse estranee. In quanto tale, l'ipotesi di un impianto di pirolisi EfW essendo autosufficiente utilizzando il proprio gas e il proprio prodotto di olio, deve anche essere soddisfacente”<sup>1</sup>. Scientificamente parlando, questo articolo è ben costruito e non ha alcun errore. D'altro canto, si nota una concentrazione elevata sul bilancio negativo dell'energia dicendo che nessun impianto può funzionare se non è in positivo il secondo principio della termodinamica. Cosa tutt'altro che vera poiché il bilancio energetico non è l'unico aspetto che porta un impianto ad essere, industrialmente parlando, efficiente. È vero, la pirolisi perde energia alla fine del processo, come altri processi, ma è molto vantaggiosa economicamente parlando.

<sup>1</sup>A. Rollinson, 'Patented blunderings', *efficiency awareness, and self-sustainability claims in the pyrolysis energy from waste sector*; (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918304117>), febbraio 2019.

## 8-CONCLUSIONE

Grazie alle ricerche svolte, si è giunti alla conclusione che, per alcune tipologie di matrici, persiste un grande bisogno di smaltimento alternativo e la soluzione si trova nella pirolisi, una risposta concreta, ma in fase di costruzione. Tramite questo processo non servirebbe più inviare tonnellate di rifiuti in discarica e in inceneritore, bensì si potrebbero valorizzare e riutilizzare in svariati modi. La pirolisi apre le porte a diversi obiettivi. Lo smaltimento è uno dei più proposti e consiste nella diminuzione del numero di tonnellate di rifiuti (principalmente RSU) da inviare in discarica o inceneritore. In media, si può arrivare ad ottenere una sottrazione del 70-80% sul totale. Questo numero dipende particolarmente dalle tipologie di rifiuti entranti: un carico colmo di RSU con poca umidità e materiali con legami deboli è molto più riducibile rispetto ad un carico contenente plastiche, cellulosa, vetro e materiale umido.

Un altro obiettivo è la produzione principale di energia che può essere conseguito dal trattamento di molte matrici. Nell'impianto di Hamm-Uentrop entravano 100,000 t/a di RSU, plastiche leggere e vari rifiuti da attività commerciali con un potere calorifico medio di 18,100 kJ/kg (il doppio dell'impianto di Burgau) che risultavano perfetti per ottenere energia termica. Essa può essere utilizzata in varie situazioni: dalla vendita ad aziende esterne, all'utilizzo nel proprio impianto per renderlo autoalimentato. Questo utilizzo può essere considerato come effetto secondario della pirolisi perché si può avere come obiettivo primario lo smaltimento dei rifiuti (o altro) e ottenere energia termica necessaria a rendere autosufficiente l'autonomia dell'impianto dai syngas prodotti.

La pirolisi si può utilizzare anche nella trattazione dei metalli. Cambiando la prospettiva dei risultati ottenuti dal processo, la frazione nobile da ottenere non sarà più nei syngas o nei syngas, bensì sarà la frazione degli inerti. Grazie al processo chimico di divisione delle molecole in radicali minori, si possono ricavare metalli ripuliti dalle impurità in eccesso.

In termini di analisi energetica, il trattamento di materie prime tramite questo processo non è conveniente semplicemente per il secondo principio della Termodinamica. Ciò è dovuto dal divario energetico tra energia necessaria all'attivazione dell'impianto con l'energia prodotta da esso stesso.

Come già descritto nel capitolo riguardante la visione economica, l'impianto di pirolisi è molto interessante per le sue potenziali rese economiche. I lati positivi riguardano i valori dei prodotti finali in massa del ciclo di trattamento e il valore dell'energia termica (o elettrica) che si riesce ad estrarre e a convogliare verso clienti (esterni o interni) che accettano tali energie come utili al proprio fabbisogno. Altri lati positivi di nota sono il potenziale miglioramento del ciclo ambientale, rispetto alle principali tecnologie utilizzate ora, ed al valore sociale e di salute pubblica che porterebbe ad un'indipendenza di smaltimento dei rifiuti alla comunità stessa, seguendo un ideale che presuppone che ogni gruppo di Cittadini decida di tenere e smaltire in proprio i rifiuti per trasformarli in una ricchezza aggiuntiva.

Uno dei motivi principali per cui non si trovano in Italia impianti funzionali al 100% di pirolisi è dovuto principalmente dalla mancanza di una normativa appropriata. A parte casi isolati, non esiste nulla che renda in regola l'attività di un grande impianto di pirolisi e che ne indichi i criteri dei parametri di lavorazione. In poche parole, un rifiuto trattato con la pirolisi rimane un rifiuto pur avendo caratteristiche identiche ad altri prodotti commerciabili. Come detto in precedenza, i risultati finali del processo sono:

- valore dei prodotti finali in massa

- valore delle energie risultanti che si riescono ad ottenere

Nonostante un tale ciclo porti ad un risparmio di CO<sub>2</sub> totale emessa e nonostante questi flussi energetici configurino un "recupero come energia" che nella Gerarchia dei rifiuti Europea (in ordine: prevenzione; riutilizzo e preparazione per il riutilizzo; riciclo; recupero; smaltimento) è obbligatoriamente da preferirsi alla Discarica ed all'Inceneritore, non esiste alcuna forma di agevolazione di questi meccanismi di generazione di energia, rispetto a quelli tradizionali basati sulla combustione di fonti fossili. Riassumendo questa parte con una sola frase:

Non esistono minimamente le condizioni normative, legislative e di incentivazione che permettono di dichiarare End of Waste o EoW ("cessazione della qualifica di rifiuto") per consentire una piena valorizzazione dei risultati ottenibili per pirolisi dei rifiuti.

La pirolisi dei rifiuti, per tutte le ragioni elencate in questa ricerca ed in queste conclusioni, ha tutte le potenzialità per sostituire in buona parte, i trattamenti consolidati mondiali, ovvero la messa a discarica e l'incenerimento. Concentrandosi sulle ragioni sociali che dovrebbero portare alla transazione verso l'uso di impianti di pirolisi come trattamento preferenziale, sottolineo che gli impianti di messa a discarica e di incenerimenti sono molto grandi poiché devono raccogliere e concentrare tutti i rifiuti di un certo bacino di produzione, spesso elevato. Invece, gli impianti di pirolisi vanno pensati come impianti di grandezza piccola o media, distribuiti sul territorio e vicini al luogo di produzione dei rifiuti. Ciò porterebbe ad un maggiore controllo e ad una diminuzione del costo dei trasporti, nonché una diminuzione della quantità di rifiuti portati all'estero. Quindi, gli impianti di pirolisi sono da pensare come un modo per avvicinare il controllo dei rifiuti alla comunità che li produce e, in questo modo, i cittadini diventerebbero autori della impresa economica detta "valorizzazione del rifiuto". Se le società di gestione fossero "Public Company", ovvero con azionariato distribuito (cittadini soci con un'azione a testa: "una testa un voto"), indipendentemente dal numero di azioni possedute, la redistribuzione di ricchezza proveniente dai rifiuti, nella comunità sarebbe completa.

Collegandosi al precedente paragrafo, l'unica reale via di confutazione di certi articoli è progettare, testare e portare al successo economico, ambientale e sociale gli impianti di pirolisi per poi confermarli o migliorarli. Richard Buckminster Fuller (1895 – 1983), padre fondatore delle nanotecnologie, architetto, designer ed inventore statunitense scrisse due cose che sono particolarmente adatte a questo studio:

1. "L'inquinamento non è altro che risorse non utilizzate. Le disperdiamo perché non ne conosciamo il valore."
2. "Non cambierai mai le cose combattendo la realtà esistente. Per cambiare qualcosa, costruisci un modello nuovo che renda la realtà obsoleta."



## 9-APPENDICI

Figura 1: Redazione, *Oltre 105mila tonnellate di rifiuti elettronici raccolti in Italia nel 2018 da Ecodom*, in <https://igizmo.it/oltre-105mila-tonnellate-di-rifiuti-elettronici-raccolti-in-italia-nel-2018-da-ecodom/>, 4 gennaio 2019.

Figure 2,5: DGEEngineering, *Waste Pyrolysis Plant "Burgau"*, in <http://www.dgengineering.de/download/open/Burgau-2009-EN.pdf>, luglio 2009.

Figure 3,4: Piromak SRL, in <https://www.piromak.it/it/home/>.

Figure 7,8,9,10: Geom. Cerabino Roberto, 1.1.4 2020, *Relazione Tecnica Por Fesr. ECO-design e riciclo di DPI in una filiera industriale circolare*, Da PDF fornito da Elite Ambiente, Accesso il 10 maggio 2023.

## 10-BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Arpat, *Dati di progetto dell'impianto. Dati estratti dalla Relazione Tecnica allegata al progetto depositato dalla ditta NSE Industry S.p.A.* <https://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/rifiuti/impianti-di-gestione-dei-rifiuti/pirogassificatore-di-castelfranco-di-sotto-pi/schema-impiantistico>, Accesso il 10 maggio 2021.

Arpat, *Schema impiantistico. Dati estratti dalla Relazione Tecnica allegata al progetto depositato dalla Ditta NSE Industry S.p.A.* <https://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/rifiuti/impianti-di-gestione-dei-rifiuti/pirogassificatore-di-castelfranco-di-sotto-pi/dati-di-progetto-dellimpianto>, Accesso il 10 maggio 2021.

Alston Sue M., *Environmental impact of pyrolysis of mixed weee plastics*, in <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es201664h>, Pubblicato da American Chemical Society, 1° novembre 2011.

Andrew Neil Rollinson, *"Patented blunderings", efficiency awareness, and self-sustainability claims in the pyrolysis energy from waste sector*, in [https://www.researchgate.net/publication/331113635\\_%27Patented\\_blunderings%27\\_efficiency\\_awareness\\_and\\_self-sustainability\\_claims\\_in\\_the\\_pyrolysis\\_energy\\_from\\_waste\\_sector](https://www.researchgate.net/publication/331113635_%27Patented_blunderings%27_efficiency_awareness_and_self-sustainability_claims_in_the_pyrolysis_energy_from_waste_sector), Pubblicato Elsevier, febbraio 2019.

Ayesha Tariq Sipra, *Municipal solid waste pyrolysis for bio-fuel products: a review of effects of MSW components and catalysts*, in <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382017318064>, Pubblicato da Elsevier, 15 giugno 2018.

Bernardi Lorenzo, *Pirolisi, cos'è e chi la usa per smaltire i rifiuti*, in <https://www.startmag.it/energia/pirolisi-rifiuti/>, Pubblicato da StartMag, 24 novembre 2018.

Chiavari Giuseppe e Ravanelli Marzia, *Metodi di caratterizzazione dei materiali organici: la pirolisi analitica*, in [https://www.jstor.org/stable/24395182?seq=1#metadata\\_info\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/24395182?seq=1#metadata_info_tab_contents), Pubblicato da Centro della Edifimi S.r.l., 1999.

- Cossu Raffaele, *Plasmix management: LCA of six possible scenarios*, in <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17305767>, Elsevier, novembre 2017.
- De Feo Giovanni, *Fanghi di Depurazione: produzione, caratterizzazione e trattamento*, in [https://www.darioflaccovio.it/abstracts/9788857902111/fanghi-di-depurazione-trattamento-acque\\_9788857902111.pdf](https://www.darioflaccovio.it/abstracts/9788857902111/fanghi-di-depurazione-trattamento-acque_9788857902111.pdf), Pubblicato da Dario Flaccovio s.r.l., ottobre 2013.
- DGEngineering, *Waste Pyrolysis Plant "Burgau"*, in <http://www.dgengineering.de/download/open/Burgau-2009-EN.pdf>, luglio 2009.
- Elite Ambiente, 23.06.2020, *Report contenente risultati dell'applicazione del modello predittivo degli impatti ambientali ai processi produttivi coinvolti nella filiera e all'eventuale individuazione di assetti ottimali*. Relazione finale progetto ECODPI, Da PDF fornito da Elite Ambiente
- Elite Ambiente, 23/06/2020. *Report contenente i risultati della campagna di test su impianto di pirolisi. Definizione condizioni di ingresso delle matrici, parametri di processo, valutazione impatto ambientale*. Relazione finale progetto ECODPI, 23/06/2020, Da PDF fornito da Elite Ambiente.
- Geom. Cerabino Roberto, 1.1.4 2020, *Relazione Tecnica Por Fesr*. ECoDesign e riciclo di DPI in una filiera industriale circolare, Da PDF fornito da Elite Ambiente, Accesso il 10 maggio 2023.
- Katarzyna Jagodzinska, *Pyrolysis of excavated waste from landfill mining: Characterisation of the process products*, in [https://www.researchgate.net/publication/343616196\\_Pyrolysis\\_of\\_excavated\\_waste\\_from\\_landfill\\_mining\\_Characterisation\\_of\\_the\\_process\\_products](https://www.researchgate.net/publication/343616196_Pyrolysis_of_excavated_waste_from_landfill_mining_Characterisation_of_the_process_products), Pubblicato da Journal of Cleaner Production, Agosto 2020.
- Lam, S. S., Yek, P. N. Y., Ok, Y. S., Chong, C. C., Liew, R. K., Tsang, D. C. W., Park, Y. K., Liu, Z., Wong, C. S., & Peng, W. (2020). *Engineering pyrolysis biochar via single-step microwave steam activation for hazardous landfill leachate treatment*. Journal of hazardous materials, 390, [121649]. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121649>
- Wen Song, *Pilot-Scale pyrolytic remediation of crude-oil-contaminated soil in a continuously-fed reactor: treatment intensity trade-offs*, in <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b05825>, Pubblicato da American Chemical Society, 25 gennaio 2019.
- Mauri Alberto, *Tecnologia per la valorizzazione energetica dei rifiuti urbani ed assimilabili*, in <http://www.atorifiutitorinese.it/cms/enteh/atti-e-documenti/determine-del-sergretario/determine/documenti-tecnici/895-mauri/file>, Pubblicato da I.CO.M. Milano-Tecnocentro, 30 Giugno 2008.
- Panepinto Deborah, *Analisi analitico sperimentale dei trattamenti termici tradizionali ed innovativi per diverse matrici solide*, in [https://gitisa.it/wp-content/uploads/tesi/2013/05-Tesi\\_Deborah\\_Panepinto.pdf](https://gitisa.it/wp-content/uploads/tesi/2013/05-Tesi_Deborah_Panepinto.pdf), Pubblicato da Politecnico di Torino, 2011.
- Piromak SRL, in <https://www.piromak.it/it/home/>.
- Porteous A., *Why Energy from waste incineration is an essential component of environmentally responsible waste management*, in <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X05000747>, Pubblicato da Elsevier, 2005.
- Prezero Pyral, in <https://www.prezero-pyral.com/>.



Redazione, *Oltre 105mila tonnellate di rifiuti elettronici raccolti in Italia nel 2018 da Ecodom*, in <https://igizmo.it/oltre-105mila-tonnellate-di-rifiuti-elettronici-raccolti-in-italia-nel-2018-da-ecodom/>, 4 gennaio 2019.

Saccà Rosario, Ordine dei chimici della provincia di Messina, *Biomasse vegetali ed energia* in <http://www.chimicimessina.it/wp-content/uploads/2015/09/energia.pdf>, 29 luglio 2015.

Serra Simone, *Il processo di Pirolisi*, in <https://www.appuntidigitali.it/16536/il-processo-di-pirolisi-applicazioni-3a-parte/>, 21 novembre 2011.

*Smaltimento rifiuti: problema o opportunità?*, in <https://jocelyn72s.altervista.org/smaltimento-rifiuti-problema-affrontare-muso-duro/>, 24 settembre 2014.

Sfera Italia S.p.A., <https://www.sferaitalia.net/pirolisi/>.

Tuffi Riccardo, *Feedstock recycling di rifiuti costituiti da plastiche miste mediante pirolisi*, in [https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2016\\_2\\_54\\_ca.pdf](https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2016_2_54_ca.pdf), pubblicato da ENEA, aprile 2016.

Università degli Studi di Cagliari, *Pirolisi e pirogassificazione delle biomasse*, in <https://sites.unica.it/fitogen/pirolisi-e-pirogassificazione-delle-biomasse/>.