



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

**Valutazione a confronto delle prestazioni di Bio-polimeri
e loro omologhi tradizionali**

Comparative evaluation of the performance of Bio-polymers
and their traditional counterparts

Relatrice:

Prof. Maria Letizia Ruello

Tesi di Laurea di:

Thomas Valeri

Anno Accademico 2023 – 2024

INDICE

INTRODUZIONE	6
1. BIO-POLIMERI	9
1.1 PRODUZIONE BIO-POLIMERI	11
1.2 TIPOLOGIE DI BIO-PLASTICHE.....	11
1.3 CLASSIFICAZIONE DELLE PLASTICHE BIO-BASED	13
1.4 CONTENUTO DI CARBONIO ORGANICO.....	14
1.5 BIODEGRADABILITÀ E COMPOSTABILITÀ	15
1.6 VANTAGGI E SVANTAGGI DEI BIO-POLIMERI.....	18
1.6.1 SWOT	20
2. VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA	21
2.1 FINE VITA.....	23
2.1.1 RICICLAGGIO	23
2.1.2 BIODEGRADAZIONE	23
2.1.3 COMPOSTAGGIO.....	23
2.1.4 DIGESTIONE ANAEROBICA	23
2.1.5 INCENERIMENTO.....	24
2.1.6 DISCARICA.....	24
2.2 RECUPERO ENERGETICO NEGLI IMPIANTI	26
2.3 EMISSIONI DA INCENERIMENTO DEI BIO-POLIMERI.....	27
2.3.1. METODO DI INDAGINE:.....	27
2.3.2 COMBUSTIONE DI CAMPIONI DI BIOPOLIMERO	28
2.3.3 ASSORBIMENTO DEI FUMI	28
2.3.4 DESORBIMENTO E RIGENERAZIONE DEI FUMI.....	28
2.3.6 RISULTATI.....	29
3. Bio-POLIETILENE	30
3.1 PROCESSO DI PRODUZIONE DEL BIO-PE.....	32
3.2 TIPI DI BIO-PE.....	34
3.3 APPLICAZIONI BIO-PE	35
3.4 CARATTERIZZAZIONE DELLA RESINA PE.....	36
3.4.1 SPETTROSCOPIA INFRAROSSA A TRASFORMATATA DI FOURIER - FTIR.....	36
3.4.2 ANALISI TERMOGRAVIMETRICA - TGA	36

3.4.3 CALORIMETRIA A SCANSIONE DIFFERENZIALE - DSC	36
3.4.4 CONTENUTO DI CARBONIO BIO-BASED	37
3.4.5 ANALISI TERMICA DEL PE	37
4. PROVE SPERIMENTALI.....	41
4.1 PARTICOLATO ATMOSFERICO - PM.....	41
4.2 MATERIALI	42
4.2.1 ACIDO POLILATTICO - PLA	42
4.2.2 SOLVENTE.....	43
4.3 TEST EFFICIENZA DI FILTRAZIONE PM.....	44
4.3.1 CALCOLO DELL'EFFICIENZA DI FILTRAGGIO	47
4.4 RISULTATI E OSSERVAZIONI.....	48
4.4.1 10% PLA / ACETONE	48
5. CONSIDERAZIONI FINALI.....	51
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA	53

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

- AMS** = Accelerator Mass Spectrometry = Spettrometria di massa con acceleratore
- ATR** = Attenuated Total Reflectance = Riflettanza totale attenuata
- ASTM** = American Society for Testing and Materials = Società americana per test e materiali
- BCC** = Bio-based Carbon Content = Carbonio a base biologica
- Bio-HDPE** = High Density Bio-Polyethylene = Bio-Polietilene ad alta densità
- Bio-LDPE** = Low Density Bio-Polyethylene = Bio-Polietilene a bassa densità
- Bio-LLDPE** = Linear Low Bio-Polyethylene = Bio-Polietilene lineare a bassa densità
- Bio-PBS** = Bio-Polybutylene Succinate = Bio-Polibutilene succinato
- Bio-PE** = Bio-Polyethylene = Bio-Polietilene
- Bio-PET** = Bio-Polyethylene Terephthalate = Bio-Polietilene tereftalato
- C** = Carbon = Carbonio
- CCU** = Carbon Capture and Utilization = Cattura e utilizzo dell'anidride carbonica
- CEN** = European Committee for Standardization = Comitato Europeo per la standardizzazione
- CH₄** = Methane = Metano
- CHP** = Combined Heat and Power = Cogenerazione di calore ed energia
- CO₂** = Carbon dioxide = Anidride carbonica
- COV** = Volatile Organic Compounds = Composti organici volatili
- DIN** = Deutsches Institut für Normung = Istituto tedesco per la standardizzazione
- DSC** = Differential Scanning Calorimetry = Calorimetria a scansione differenziale
- DTGA** = Differential Thermogravimetric Analysis = Analisi termogravimetrica differenziale
- EoL** = End of Life = Fine vita
- FTIR** = Fourier-Transform Infrared Spectroscopy = Spettroscopia infrarossa a trasformata di Fourier
- GHG** = Greenhouse Gases = Gas serra
- GWP** = Global Warming Potential = Potenziale di riscaldamento globale
- H** = Hydrogen = Idrogeno
- HDPE** = High Density Polyethylene = Polietilene ad alta densità
- ISO** = International Organization for Standardization = Organizzazione internazionale per la normazione

IPCC = Intergovernmental Panel On Climate Change = Gruppo Intergovernativo sui cambiamenti climatici

IRMS = Isotope Ratio Mass Spectrometry = Spettrometria di massa isotopica

JIS = Japanese Institute for Standardization = Istituto giapponese per la standardizzazione

LCA = Life Cycle Assessment = Analisi del ciclo di vita

LCI = Life Cycle Inventory = Inventario del ciclo di vita

LDPE = Low Density Polyethylene = Polietilene a bassa densità

MSWI = Municipal Solid Waste Incineration = Incenerimento dei rifiuti solidi urbani

N = Nitrogen = Azoto

N₂O = Nitrous Oxide = Protossido di azoto

O = Oxygen = Ossigeno

PBAT = Polybutylene Adipate Terephthalate = Polibutilene adipato tereftalato

PE = Polyethylene = Polietilene

PET = Polyethylene Terephthalate = Polietilene tereftalato

PHA = Polyhydroxyalkanoates = Polioidrossialcanoati

PLA = Polylactic acid = Acido polilattico

PM = Particulate Matter = Particolato

PP = Polypropylene = Polipropilene

PS = Polystyrene = Polistirene

PUR = Polyurethane = Poliuretano

SRF = Solid Recovered Fuels = Combustibili solidi recuperati

SWOT = Strengths Opportunities Weaknesses Threats = Punti di forza Punti di debolezza Opportunità Minacce

T_c = Temperature = Temperatura di cristallizzazione

T_{deg} = Degradation Temperature = Temperatura di degradazione

TGA = Thermogravimetric Analysis = Analisi termogravimetrica

T_m = Melting Temperature = Temperatura di fusione

TOC = Total Organic Carbon = Carbonio organico totale

VCI = Verband der Chemischen Industrie = Associazione dell'industria chimica

WtE = Waste to Energy = Valorizzazione dei rifiuti

INTRODUZIONE

L'inquinamento da plastiche, al giorno d'oggi, non è più un fenomeno trascurabile, tanto da attirare l'attenzione dei governi, delle istituzioni e della società civile.

La plastica, dalla sua scoperta, ha visto crescere il suo utilizzo in maniera esponenziale, soprattutto grazie alla sua economicità e alle sue buone proprietà termiche e meccaniche, trovando grande impiego in vari settori, ma le applicazioni monouso, come gli imballaggi, sono le più numerose. [29]

Attualmente, la produzione globale di materiali plastici ammonta a 359 milioni di tonnellate con un fatturato di oltre 350 miliardi di euro per l'Industria Europea della Plastica. [35]

La quantità complessiva di plastica scaricata nei rifiuti solidi urbani ha raggiunto un livello allarmante di circa 242 milioni di tonnellate per un solo anno. [25]

L'industria petrolchimica nel suo complesso è responsabile del 18% delle emissioni industriali globali di gas serra (GHG), diventando così la terza industria al mondo per emissioni di CO₂. [24]

Essendo un derivato del petrolio, la plastica è causa di grande inquinamento sia in fase di produzione che in fase di smaltimento, in quanto si tratta di un prodotto non degradabile, di conseguenza rimane nell'ambiente a lungo senza subire variazioni sostanziali.

A tal proposito, con l'evoluzione della gestione dei rifiuti verso la gestione delle risorse, si sta verificando un cambiamento di paradigma, confermato ufficialmente dalla Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, in cui viene stabilita la gerarchia della gestione dei rifiuti in cinque fasi:

- Prevenzione dei rifiuti
- Preparazione per il riutilizzo
- Riciclaggio dei materiali
- Recupero di altro tipo (ad es. recupero di energia)
- Trattamento e smaltimento

Per l'attuazione della cosiddetta "*Economia Circolare*", possibile soluzione al problema dell'inquinamento, è stato rilevato che la combinazione di riciclo, utilizzo della biomassa, cattura e utilizzo dell'anidride carbonica potrebbe portare alla produzione di plastiche

biologiche a emissioni di carbonio pari a zero: grazie al loro utilizzo nelle energie rinnovabili, nei veicoli elettrici, nei dispositivi medici, negli imballaggi alimentari e in molte altre applicazioni. [39]

Sebbene i risultati siano promettenti, molti studi hanno preso in considerazione solo le emissioni di CO₂. Tuttavia, per raggiungere gli obiettivi del Gruppo Intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC) di 1,5°C entro il 2050, è necessario raggiungere contemporaneamente una riduzione del 50% e del 22% delle emissioni di CH₄ e N₂O, oltre alle strategie di decarbonizzazione. [39]

La produzione attuale di questi materiali è stimata intorno a 2,4 milioni di tonnellate, e si prevede che triplicherà entro il 2026. [31] Tale previsione rivela la crescita esponenziale di questo settore come risposta alle recenti tendenze di sostenibilità.

L'attuale offerta di bio-polimeri comprende prodotti come il Bio-PE, Bio-PET, Bio-PBS, PLA, PHA che sono versioni bio-based della plastica.

Nello specifico, il bio-PE ha ricevuto una crescente attenzione a causa dell'importanza dei suoi minerali fossili. Sono in corso investimenti per aumentare la produzione di questo materiale, che attualmente rappresenta circa il 10% del mercato mondiale delle bio-plastiche, con 0,2 milioni di tonnellate prodotte ogni anno. [31]

La sfida futura per questi bio-polimeri sarà l'abbattimento del costo di produzione, ad oggi ancora maggiore rispetto a quello delle plastiche tradizionali.

Lo scopo di questa tesi è di confrontare e valutare le prestazioni dei bio-polimeri, mostrandone pregi e difetti e confrontare il loro impatto rispetto agli omologhi tradizionali.

Nello specifico si vuole descrivere dettagliatamente il Bio-PE, confrontandolo con il PE fossile in termini di produzione e prestazioni.

Infine, verrà analizzata la capacità filtrante di un filtro realizzato in Acido Polilattico, attraverso prove svolte presso l'Università Politecnica delle Marche, nel Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU).

La presente tesi è stata articolata nei seguenti capitoli:

- Capitolo 1: vengono descritti i bio-polimeri e le diverse tipologie presenti, viene poi illustrato il contenuto di carbonio, la biodegradabilità e compostabilità. Infine, vengono illustrati i pro e i contro con la relativa analisi SWOT.
- Capitolo 2: viene descritta l'analisi della valutazione del ciclo di vita.
- Capitolo 3: viene descritto il Bio-PE, dal processo di produzione alle possibili applicazioni. Infine, viene messo a confronto con il PE tradizionale.
- Capitolo 4: tratta la parte sperimentale relativa ai test svolti sui filtri, riportando le fasi e i risultati.
- Capitolo 5: conclusione.

1. BIO-POLIMERI

Spesso, in maniera equivoca, si associa il termine bio-polimero e bio-plastica allo stesso tipo di materiale. In realtà, il termine bio-polimero si riferisce ad un polimero prodotto da organismi viventi, quindi totalmente bio-based e, in alcuni casi, biodegradabile. Il termine bio-plastica, invece, ha un significato più ampio, e non necessariamente si comprende polimeri derivati da fonti rinnovabili e biodegradabili.

Secondo la “European Bioplastics”, l’ente europeo incaricato di occuparsi dello sviluppo, dell’assistenza e dell’informazione nel campo delle bio-plastiche, un materiale viene detto bio-plastica se almeno una delle due caratteristiche seguenti è verificata [19]:

- deriva, anche parzialmente, da risorse rinnovabili, quindi risulta bio-based;
- è biodegradabile.

Le fibre naturali necessarie per produrre questi materiali possono essere di origine vegetale, animale o minerale.

- **Origine vegetale:** hanno un’origine molto varia, in quanto possono provenire dai vari componenti della pianta, come ad esempio il seme, il frutto, la foglia e lo stelo. Solitamente si preferiscono piante ricche di carboidrati (es. cereali come il mais), ricche di amido (es. le patate e la tapioca) e ricche di zuccheri (es. la barbabietola e la canna da zucchero).
- **Origine animale:** sono fibre destinate prevalentemente al settore tessile, come ad esempio la seta.
- **Origine minerale:** solitamente sono fibre di lunghezza limitata.

Con il termine bio-plastica, secondo la “European Bioplastics”, possiamo differenziare tre macro-famiglie di polimeri:

- Polimeri derivati da fonti rinnovabili e biodegradabili (bio-polimeri in senso stretto).
- Polimeri derivati da fonti rinnovabili ma non biodegradabili.
- Polimeri derivati da fonti non rinnovabili (petrolio) ma biodegradabili.

Tabella n. 1 - Classificazione delle plastiche. [35]			
Tipo	Degradabilità	Fonte	Polimero
Plastica tradizionale	Non biodegradabile	Non rinnovabile	PE, LDPE, HDPE, PS, PVC, PP, PET, PUR
Bio-plastica	Biodegradabile	Non rinnovabile	Bio-PBS, PBAT
Bio-plastica	Non biodegradabile	Rinnovabile	Bio-PE, Bio-PP, Bio-PET
Bio-plastica	Biodegradabile	Rinnovabile	PLA, PHA, Plastica a base di amido

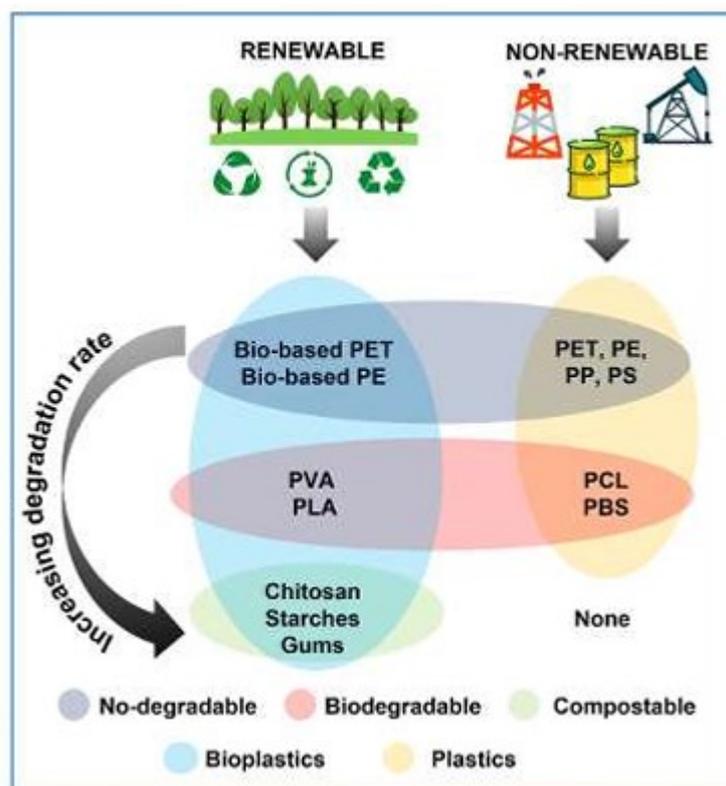


Figura n. 1 - Rappresentazione dei polimeri rinnovabili e non rinnovabili in base al loro smaltimento. [37]

1.1 PRODUZIONE BIO-POLIMERI

Esistono tre diversi metodi per la produzione di plastiche bio-based:

- 1) Utilizzando polimeri naturali che possono essere modificati, ma che in larga scala rimangono intatti (es. plastiche a base di amido).
- 2) Producendo monomeri bio-based tramite fermentazione o processi chimici convenzionali, polimerizzando queste unità di base in un secondo momento (es. PLA, Bio-PE).
- 3) Producendo polimeri bio-based direttamente nei microrganismi o in colture geneticamente modificate (es. PHA).

1.2 TIPOLOGIE DI BIO-PLASTICHE

– **PLA (Acido Polilattico):**

- Origine: derivato dall'acido lattico, prodotto attraverso la fermentazione di canna da zucchero o amido di mais.
- È il bio-polimero più conosciuto a livello mondiale e un valido sostituto del polistirene (PS) e del polipropilene (PP).
- Negli impianti industriali di compostaggio, in condizioni di umidità elevata e ad una temperatura sopra i 60°C è in grado di biodegradarsi rapidamente.
- Utilizzo: imballaggi, bicchieri e posate compostabili, filamenti per stampa 3D.

– **PHA (Poliidrossialcanoati):**

- Origine: è un poliesteri che è sintetizzato dalla fermentazione microbica degli zuccheri.
- È un polimero termoplastico elastomero, non tossico e cristallino con un basso punto di fusione, una buona resistenza fisica, chimica e ai raggi UV. Per via delle sue scarse proprietà meccaniche e l'incompatibilità con le temperature dei processi tecnici, è un materiale che viene usato in condizioni ristrette.
- Utilizzo: imballaggi alimentari, dispositivi medici, pellicole biodegradabili.

– **Bio-PBS (Polibutylene Succinato):**

- Origine: sintetizzato da acido succinico e butandiolo, entrambi derivabili da risorse rinnovabili.
- Utilizzo: sacchetti, pellicole, prodotti monouso.

– **Plastica a base di amido (Starch-based Plastic):**

- Origine: prodotta mediante miscelazione di amido (solitamente da mais o patate) con vari plasticizzanti. Vengono aggiunti per far diventare l'amido termoplastico tramite l'applicazione di calore nel processo di estrusione.
- Il prezzo è la disponibilità di grandi quantità favorendo bassi costi di produzione.
- La grande sfida con questi polimeri è cercare di renderli il più possibile resistenti, poiché risultano essere fragili e idrofili.
- Utilizzo: sacchetti compostabili, imballaggi alimentari, vassoi.

– **Bio-PE e Bio-PET:**

- Origine: prodotte utilizzando etanolo derivato dalla fermentazione di biomassa per il Bio-PE, o acido tereftalico per il Bio-PET.
- Utilizzo: bottiglie, contenitori, sacchetti, simili alle applicazioni del PE e PET convenzionali.

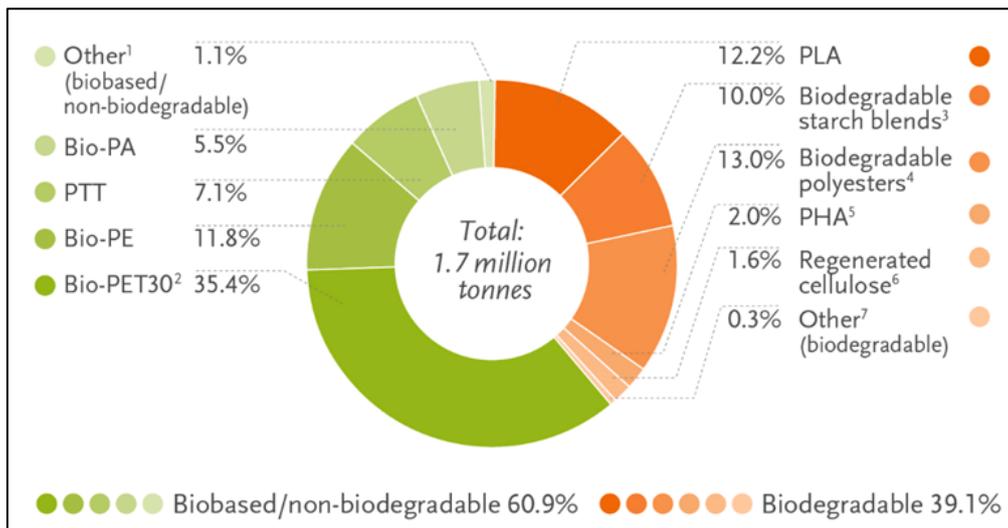
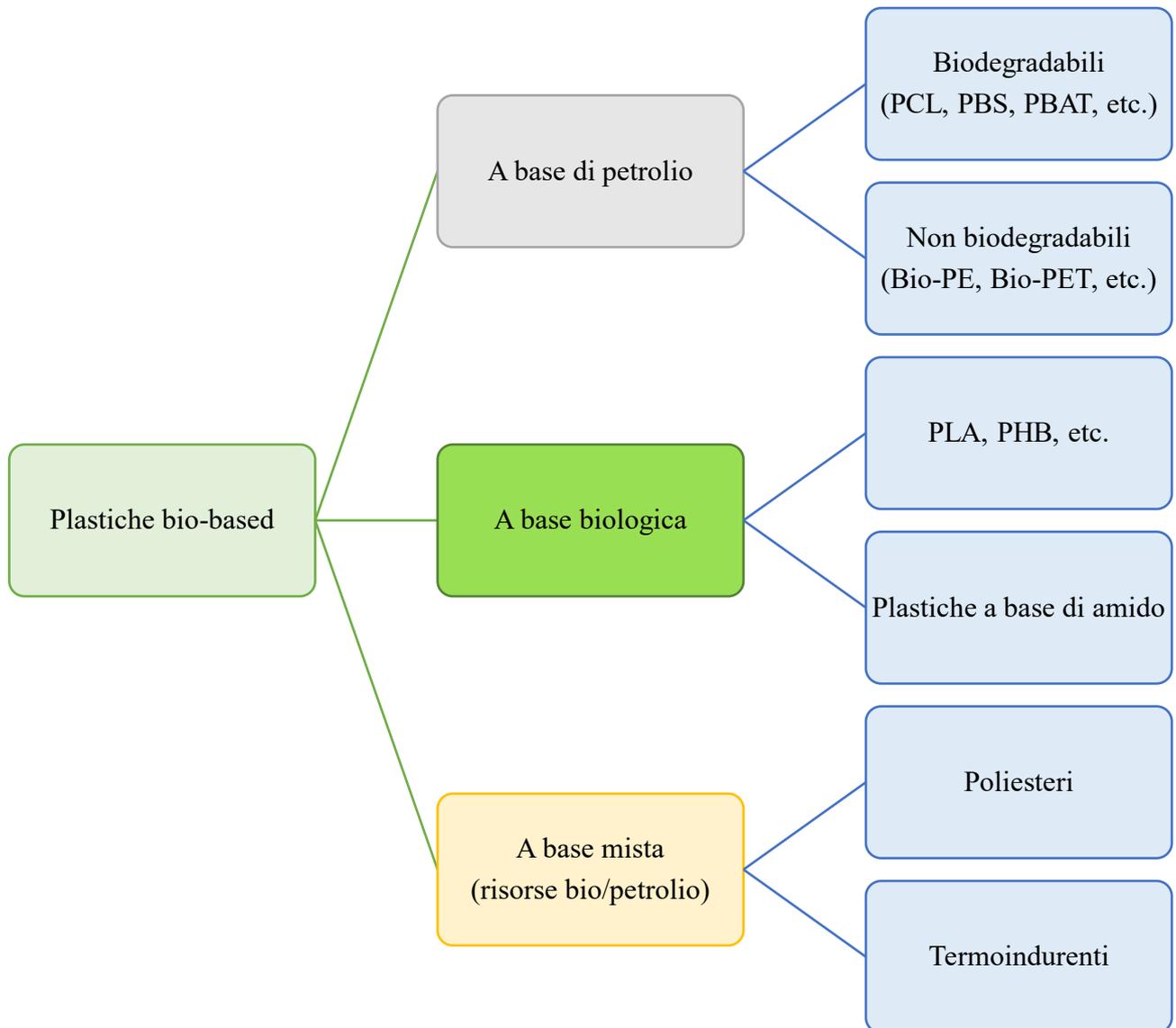


Figura n. 2 - Capacità di produzione globale di plastiche bio-based nel 2014, per tipo di materiale. [18]

1.3 CLASSIFICAZIONE DELLE PLASTICHE BIO-BASED



1.4 CONTENUTO DI CARBONIO ORGANICO

Il CEN ha sviluppato un metodo che specifica il metodo di calcolo per determinare il contenuto di carbonio di origine biologica nei materiali e nei prodotti plastici bio-based.

Resta da definire quale percentuale di contenuto di carbonio bio-based sia ritenuta sufficiente per poter chiamare un prodotto di plastica “bio-based”.

Vinçotte, un'organizzazione che certifica i prodotti a base biologica, elenca due requisiti fondamentali affinché una plastica possa essere considerata un prodotto a base biologica:

- TOC del materiale deve essere almeno del 30%;
- BCC deve essere almeno il 20% del TOC. [9]

DIN CERTCO fornisce uno schema di certificazione che richiede un TOC minimo del 50% e un BCC affine del 20%.

Per la certificazione del contenuto bio-based delle materie plastiche, in occasione dell'11^a Conferenza Europea sulla Bioplastica tenutasi a Berlino il 29 e 30 novembre 2016, è stato lanciato un nuovo sistema europeo di certificazione del contenuto bio-based, basato sulla norma EN16785-1.

Il sistema di certificazione è disponibile all'indirizzo www.biobasedcontent.eu.

Tabella n. 2 - Schemi di certificazione per il contenuto di carbonio bio-based e per il contenuto di bio-based. [16, 21]	
<p>Vinçotte: OK Bio-based</p> <p>Requisiti di base:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Il prodotto deve avere un TOC di almeno il 30%. - Il prodotto deve avere un BCC di almeno il 20%. <p>Numero di stelle:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 stella: $20\% \leq \text{BCC} \leq 40\%$ - 2 stelle: $40\% \leq \text{BCC} \leq 60\%$ - 3 stelle: $60\% \leq \text{BCC} \leq 80\%$ - 4 stelle: $80\% \leq \text{BCC}$ 	
<p>DIN CERTCO: DIN-Geprüft</p> <p>Requisiti di base:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La percentuale organica minima specificata è del 50%. - La proporzione di BCC rispetto al TOC deve superare il 20%. - Diversi livelli di qualità (basati sul BCC rispetto al TOC): - dal 20 al 50% - dal 50 al 85% - > 85% 	

1.5 BIODEGRADABILITÀ E COMPOSTABILITÀ

In presenza di ossigeno, la plastica biodegradabile viene convertita in acqua e CO₂ dai microrganismi. Quando non è presente ossigeno, è possibile produrre metano.

Sia la degradabilità che la compostabilità dipendono da condizioni quali la temperatura, il materiale e l'applicazione. [19]

La biodegradabilità di una plastica non dipende dalla risorsa utilizzata, ma dalla sua struttura chimica. Ciò significa che la plastica a base biologica può essere non biodegradabile, mentre la plastica a base fossile può essere biodegradabile [19], sebbene la maggior parte non lo sia. La plastica non biodegradabile non verrà convertita dai microrganismi.

La biodegradabilità dipende soprattutto dall'aggressività dell'ambiente che aumenta dall'acqua marina all'acqua dolce, al suolo e ad un impianto di compostaggio. [8]

Un impianto di compostaggio industriale crea un ambiente più aggressivo rispetto al compostaggio domestico.

Per quanto riguarda la biodegradabilità e la compostabilità, le norme sono più complesse.

Gli standard più importanti sono sviluppati da: ISO, CEN, ASTM, DIN e JIS.

Gli standard di queste organizzazioni mirano a diversi modi di compostaggio, a diversi livelli di utente e al trattamento/smaltimento in diversi ambienti.

La norma armonizzata EN 13432 del Comitato europeo, pubblicata nel 2000, determina le caratteristiche che un imballaggio deve possedere per potersi definire biodegradabile e compostabile. Il termine "compostabile" fa riferimento alla capacità dell'imballaggio di poter essere recuperato mediante riciclo organico. Attualmente in Italia è in vigore la UNI EN 13432 del 2002. Mentre la norma UNI EN 14995 "Plastica - Valutazione della compostabilità" è uguale nel contenuto alla UNI EN 13432, ma amplia il campo di applicazione delle plastiche quando vengono utilizzate in applicazioni diverse dall'imballaggio.

Le norme per il compostaggio industriale in entrambi gli standard sono:

- Biodegradazione: almeno il 90% dei materiali deve essere degradato in CO₂ per azione biologica entro sei mesi a 58°C ± 2°C.
- Disgregazione: dopo dodici settimane almeno il 90% del prodotto deve poter passare attraverso una rete di 2 x 2 mm.

- Composizione chimica: devono essere rispettati alcuni limiti relativi alle sostanze volatili, metalli pesanti e fluoro.
- Qualità del compost ed ecotossicità: la qualità del compost finale non dovrebbe diminuire a causa del materiale di imballaggio aggiunto.

Per il compostaggio domestico, la degradazione nel suolo, nell'acqua dolce e nell'acqua marina esistono diversi standard, ma non sono armonizzati a livello europeo.

Uno standard esistente per la biodegradazione della plastica in ambienti marini è sviluppato da ASTM.

L'organismo di certificazione Vinçotte fornisce ulteriori schemi di certificazione, gran parte basati sulla norma EN 13432. Le temperature e la durata dei test sono, tuttavia, diverse.

Tabella n. 3 - Certificati relativi alla biodegradabilità o alla compostabilità dei prodotti. Nei Paesi Bassi viene spesso utilizzato il logo Seedling, mentre il logo OK Compost è meno diffuso. [16, 21]	
<p>Logo Seedling</p> <p>Di proprietà della European Bioplastics. Dimostra che un prodotto è certificato industrialmente compostabile secondo gli standard EN 13432/14995. Processo di certificazione svolto da DIN CERTCO e da Vinçotte.</p>	 
<p>OK Compost</p> <p>Di proprietà di Vinçotte. Garantisce che il materiale (di imballaggio) soddisfi tutti i requisiti delle norme delle norme EN 13432/14995.</p>	 
<p>OK Compost Home</p> <p>Di proprietà di Vinçotte. Garantisce che il materiale (di imballaggio) soddisfi tutti i requisiti delle norme delle norme EN 13432/14995. - La biodegradazione è testata a temperatura ambiente (20-30°C) invece che a 58°C ± 2. - Il periodo di applicazione nel test di biodegradazione è di massimo di 12 mesi (invece di 6 mesi).</p>	 
<p>OK Biodegradable SOIL</p> <p>Di proprietà di Vinçotte. La norma EN 13432/14995 è stata adattata per la degradazione nel suolo, con i seguenti adattamenti: - Il periodo di applicazione per la prova di biodegradazione ha un massimo di 2 anni (invece di 6 mesi). - Non devono essere soddisfatti requisiti di disintegrazione.</p>	 

<p>OK Biodegradable WATER</p> <p>Di proprietà di Vinçotte.</p> <p>Le norme EN 13432/14995 sono state adattate per la degradazione in acqua dolce, con i seguenti adattamenti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La temperatura del test di biodegradazione deve essere compresa tra 20 e 25°C). - Il 90% di biodegradazione relativa o assoluta deve avvenire dopo 56 giorni di test. - Non deve essere soddisfatto alcun requisito di disintegrazione. 	
<p>OK Biodegradable MARINE</p> <p>Di proprietà di Vinçotte.</p> <p>Basato sulla norma americana ASTM D 7081: "Standard Specification for Non-Floating Biodegradable Plastics in the Marine Environment" (Specifica standard per plastiche biodegradabili non galleggianti in ambiente marino), adattata per la degradazione in acqua di mare (solo zona pelagica).</p> <p>Non è consentito comunicare la certificazione (mostrare il logo) sui prodotti che vengono spesso gettati in mare e che potrebbero incoraggiare i potenziali clienti a produrre rifiuti. Solo alcuni prodotti funzionali all'ambiente marino (ad esempio, lenze ed esche) possono utilizzare questo logo.</p>	

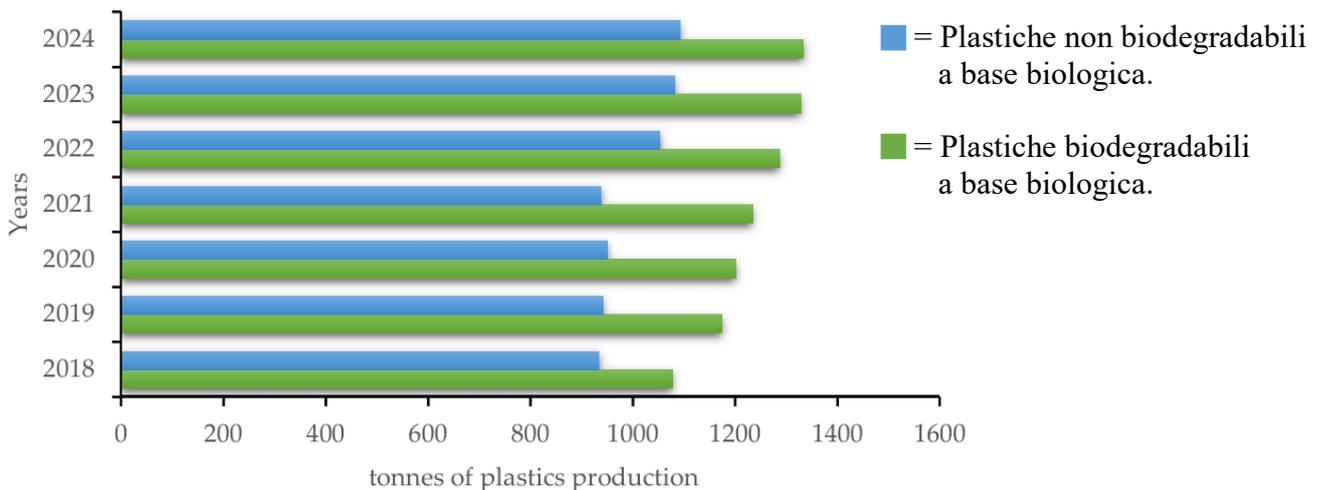


Figura n. 3 - Previsione della produzione di bio-plastiche in tonnellate dal 2019 al 2024. [30]

1.6 VANTAGGI E SVANTAGGI DEI BIO-POLIMERI

Le plastiche bio-based stanno rappresentando un settore in crescita, guadagnando attenzioni sia per il loro potenziale di riduzione dell'impatto ambientale sia per la loro applicazione in vari settori. Tuttavia, bisogna riconoscere che "bio" non implica automaticamente "verde" e, come ogni tecnologia emergente, presentano vantaggi e svantaggi importanti da valutare.

VANTAGGI: [7, 15, 38]

1. Riduzione dell'impatto ambientale:

- Fonti rinnovabili: le plastiche bio-based sono prodotte da risorse rinnovabili (canna da zucchero, mais, cellulosa) preservando l'utilizzo di materie prime fossili.
- Minore impronta di carbonio: le plastiche bio-based immagazzinano in modo permanente il carbonio, grazie alla sottrazione di CO₂ tolta all'atmosfera dalla pianta in fase crescita nel processo di fotosintesi.
- Ecocurezza: le plastiche bio-based generano meno gas serra e non contengono tossine. Contribuiscono all'obiettivo di mitigare le emissioni di gas serra con soli 0,49 kg di CO₂ emessi dalla produzione di 1 kg di resina, rispetto ai 2-3 kg di CO₂ delle controparti petrolchimiche. Si tratta di una riduzione di circa l'80% del GWP.

2. Sostenibilità del ciclo di vita:

- Rinnovabilità delle materie prime: essendo generate da risorse rinnovabili, teoricamente, possono essere prodotte indefinitamente.
- Valorizzazione dei rifiuti agricoli: gli scarti biologici possono essere usati come materia prima di 2^a generazione, utilizzando materiali che sarebbero considerati rifiuti.
- Biodegradabilità e Compostabilità: alcune plastiche bio-based sono biodegradabili e possono degradarsi più velocemente delle plastiche convenzionali, risolvendo il problema dell'accumulo dei rifiuti plastici.

3. Proprietà tecniche e applicazioni:

- Versatilità: le bio-plastiche possono essere realizzate per avere proprietà specifiche in base agli usi, dagli imballaggi a componenti automobilistici e edili.

- Produzione simile alle plastiche tradizionali: molte plastiche bio-based, come il Bio-PE, possono essere lavorate con le stesse tecnologie e attrezzature utilizzate per le plastiche convenzionali, riducendo la necessità di nuove infrastrutture.

4. Benefici economici a lungo termine:

- Indipendenza energetica: possono contribuire ad una maggiore autonomia energetica, riducendo la dipendenza dalle importazioni di petrolio.
- Economia circolare

SVANTAGGI: [7, 15, 38]

1. Costi:

- Costi di produzione elevati: si stima che il prezzo dei bio-polimeri sia da 2 a 5 volte superiore rispetto alle plastiche convenzionali, oscillando tra i 2 e i 6 €/kg contro gli 1,2 €/kg di queste ultime. [28]
- Processi di produzione: la produzione di alcune plastiche bio-based può richiedere processi complessi e innovativi che possono incrementare i costi del prodotto.

2. Problemi di disponibilità:

- Concorrenza con l'agroalimentare: la coltivazione delle materie prime vegetali per la produzione di bio-plastiche può competere con la produzione alimentare.
- Disponibilità limitata: le materie prime biologiche potrebbero non essere disponibili su larga scala per poter sostituire completamente le plastiche tradizionali.

3. Infrastrutture di riciclaggio e smaltimento:

- Riciclaggio: le bio-plastiche possono essere difficili da riciclare, in quanto devono essere separate dalle plastiche convenzionali a causa di alcune differenze nei processi di riciclaggio.
- Smaltimento: non tutte le plastiche bio-based sono biodegradabili. Quelle che possono decomporsi richiedono specifiche condizioni di compostaggio industriale.

4. Impatti ambientali:

- Utilizzo del suolo: per ricavare le materie prime necessarie per la richiesta di plastica bio-based sarebbe necessario circa il 5% della terra arabile globale. [34]

- Colture intensive: deforestazione, uso di fertilizzanti, conversione dei terreni dedicati ai pascoli causano un drastico aumento delle emissioni dei gas serra.
- Monocolture che minacciano la biodiversità

5. Dilemmi etici e sociali:

- Concorrenza con l'agroalimentare: influenzano i prezzi e la disponibilità di cibo a causa dell'abbandono della produzione alimentare da parte degli agricoltori dei Paesi in via di sviluppo.

1.6.1 SWOT

Tabella n. 4 - Analisi SWOT dei bio-polimeri.	
STRENGTHS (PUNTI DI FORZA)	OPPORTUNITIES (OPPORTUNITA')
<ul style="list-style-type: none"> • I bio-polimeri sono ecologici, prodotti da fonti rinnovabili, non tossici. • Alcuni sono biodegradabili e compostabili. • Minor impronta di carbonio rispetto alle plastiche tradizionali. • Materiali versatili con buone proprietà, simili ai loro omologhi tradizionali. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ampia gamma di utilizzo in diversi settori. • Contribuiscono a ridurre l'inquinamento ambientale favorendo l'economia circolare. • Riduzione della dipendenza dai fossili.
WEAKNESSES (PUNTI DI DEBOLEZZA)	THREATS (MINACCE)
<ul style="list-style-type: none"> • Costi di produzione elevati. • Alcune bio-polimeri richiedono processi di produzione complessi. • Riciclaggio difficile in quanto vanno separati dai loro omologhi tradizionali. 	<ul style="list-style-type: none"> • Concorrenza con la produzione alimentare per l'utilizzo della materia prima e conseguente aumento dei costi. • Monocolture che minacciano la biodiversità. • Materie prime biologiche che non soddisfano la domanda per sostituire completamente le plastiche tradizionali.

2. VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA

L'LCA è un metodo per valutare l'impatto ambientale complessivo di un prodotto o processo, considerando tutte le fasi del ciclo di vita: estrazione delle materie prime, produzione, utilizzo e fine vita.

L'ISO definisce l'LCA e le sue applicazioni in ISO-14040 [1] e ISO-14044 [2] e definisce il seguente processo iterativo:

1. Definizione degli Obiettivi e del Campo di Applicazione

- Bisogna stabilire il prodotto da analizzare.
- Bisogna stabilire gli obiettivi del caso studio.
- Bisogna stabilire dove sarà applicato il materiale.

2. Inventario del Ciclo di Vita - LCI

- Raccolta dei dati Input: materie prime utilizzate, energia elettrica, etc.
- Raccolta dei dati Output: emissioni generate, rifiuti.
- Viene analizzato il bio-polimero in ogni fase del ciclo di vita, dalla produzione della materia prima all'EoL.

3. Valutazione dell'impatto del Ciclo di Vita

- Analisi dell'impatto ambientale, basata sull'LCI, del bio-polimero che si vuole esaminare (come il riscaldamento globale, la tossicità, etc.).

4. Interpretazione dei risultati [1]

- Interpretazione dei risultati per identificare le aree critiche e trovare miglioramenti.

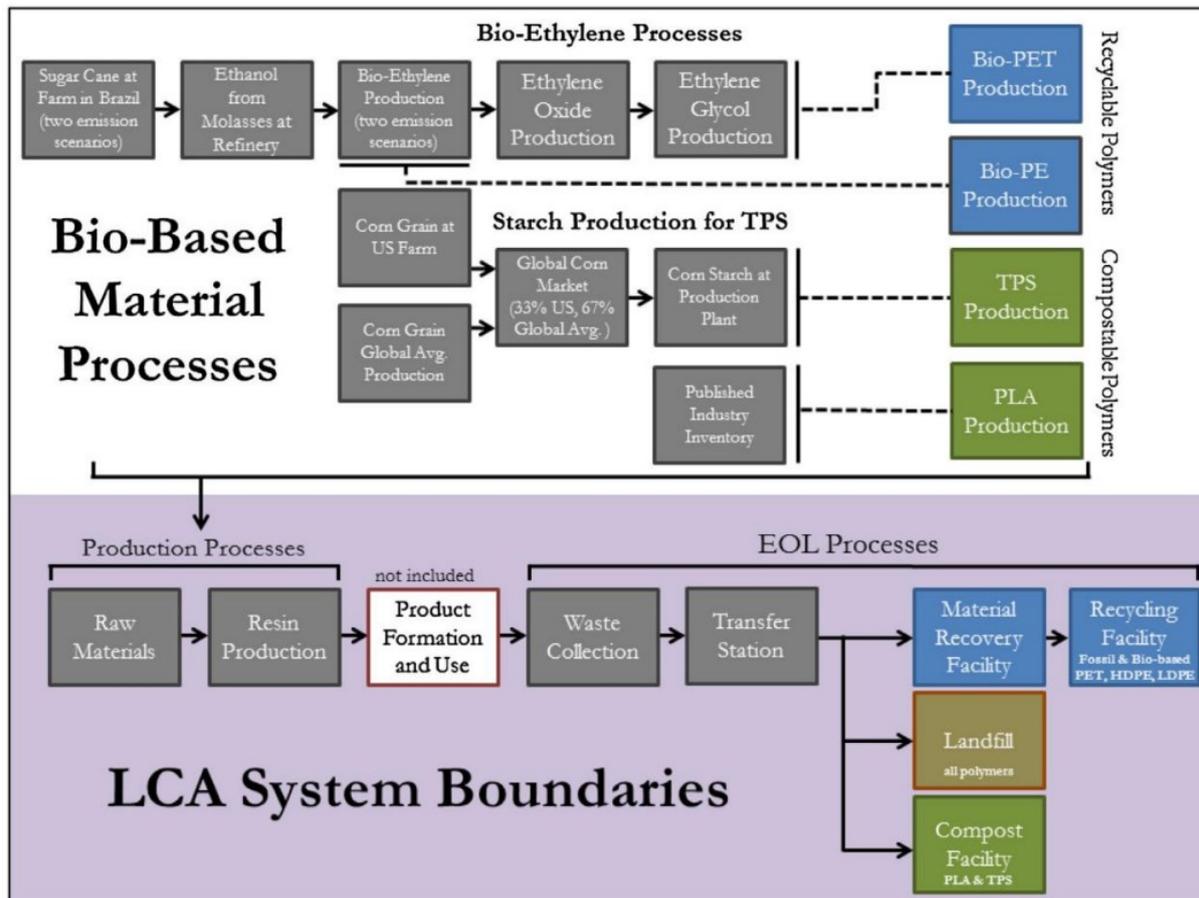


Figura n. 4 - Processi delle plastiche bio-based e confini del sistema per l’LCA, compresi i processi di produzione e di EoL. [22]

L’LCA richiede grandi quantità di dati per fornire inventari accurati di tutti i processi associati alla produzione, all’uso e alla dismissione di un prodotto.

L’impatto ambientale viene valutato sia a breve che a lungo termine per anticipare gli sviluppi che si possono verificare nell’evoluzione della gestione dei rifiuti di plastica.

L’LCA dei bio-polimeri mostra che possono offrire vantaggi ambientali significativi rispetto ai polimeri tradizionali, ma il loro impatto dipende fortemente dalle specifiche del processo di produzione, utilizzo e fine vita.

L’adozione diffusa dei bio-polimeri deve essere accompagnata da adeguate infrastrutture di gestione dei rifiuti e da una valutazione completa degli impatti ambientali per massimizzare i benefici ecologici.

2.1 FINE VITA

L'End-of-Life (fine vita) dei bio-polimeri si riferisce alla gestione di questi materiali dopo il loro ciclo di vita utile. Questo dipende fortemente dal tipo di bio-polimero, dalla disponibilità di infrastrutture e dalle condizioni locali.

Gli impatti sul riscaldamento globale variano significativamente in base allo scenario di EoL del polimero o del bio-polimero.

Ecco un sunto sui principali aspetti e le opzioni di trattamento:

2.1.1 RICICLAGGIO

- Meccanico: Consiste nella triturazione e rifusione per produrre nuovi prodotti. Adatto a bio-polimeri che non sono facilmente biodegradabili, come il Bio-PET.
- Chimico: Decomposizione dei polimeri in monomeri che possono essere riutilizzati per produrre nuovi polimeri. È un metodo più costoso e meno sviluppato.

2.1.2 BIODEGRADAZIONE

- Processo: I bio-polimeri per decomporsi, grazie all'azione dei microrganismi, necessitano di condizioni specifiche come temperatura, umidità e presenza di ossigeno
- Materiali biodegradabili: PLA, PHA, etc.

2.1.3 COMPOSTAGGIO

- Industriale: Richiede temperature elevate tra i 50°C e i 70°C e un ambiente controllato. Ad esempio, il PLA è compostabile industrialmente.
- Domestico: Alcuni bio-polimeri possono essere compostati anche in casa, ma solitamente richiede tempi più lunghi e condizioni più variabili.

2.1.4 DIGESTIONE ANAEROBICA

- Processo: Consiste nella decomposizione dei bio-polimeri tramite l'azione dei batteri, in assenza di ossigeno, producendo biogas e digestato.
- Applicabilità: Adatto ai bio-polimeri che possono essere biodegradati anaerobicamente.

2.1.5 INCENERIMENTO

- Processo: Combustione dei rifiuti plastici per generare calore, che può essere utilizzato per produrre energia elettrica e riscaldamento.
- Problemi: È un'opzione meno desiderabile a causa dell'impatto ambientale e della perdita di materiale.

2.1.6 DISCARICA

- Processo: Deposito dei rifiuti in discarica.
- Problemi: Anche i bio-polimeri biodegradabili possono richiedere molto tempo per decomporsi in discarica, contribuendo all'accumulo di rifiuti come i loro omologhi tradizionali.

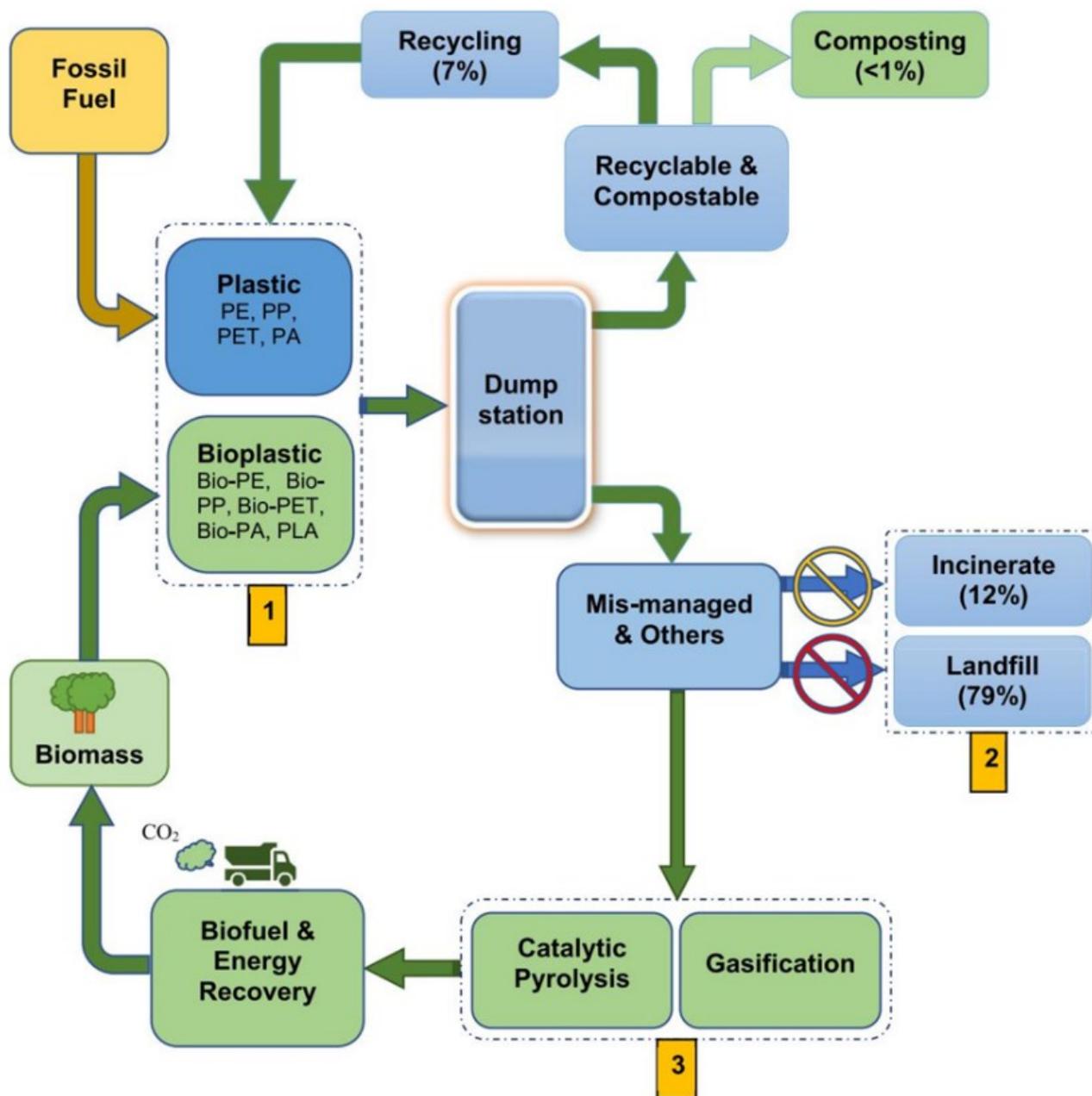


Figura n. 5 - Ruolo delle bio-plastiche nell'economia circolare per ridurre il consumo di combustibili fossili. [33]

2.2 RECUPERO ENERGETICO NEGLI IMPIANTI

I rifiuti di plastica, compresi i bio-polimeri, hanno un contenuto energetico relativamente elevato, con valori di riscaldamento paragonabili a quelli dei combustibili fossili (come carbone e petrolio). [22]

Il recupero di energia dai rifiuti negli impianti WtE è all'avanguardia e nei Paesi ecologicamente avanzati sono disponibili anche le infrastrutture e le capacità impiantistiche necessarie.

I polimeri bio-based sono chiamati i "combustibili rinnovabili", considerati "CO₂ neutrali", con una conseguente "impronta ecologica" ridotta.

Pertanto, la monocombustione dei bio-polimeri negli impianti MSWI per produrre calore ed elettricità, cioè CHP, e il co-incenerimento come SRF in altri impianti WtE, come ad esempio l'industria del cemento, sono soluzioni ragionevoli per i rifiuti di plastica. [17]

Il recupero di energia è in competizione con il riciclo dei materiali e nella realtà della gestione dei rifiuti, la combustione dei bio-polimeri sarà solitamente preferita al riciclo nel caso di frazioni complesse e miste di bio-polimeri di bassa qualità, come ad esempio, rifiuti plastici contaminati da residui alimentari.

Questo non è vero per le bottiglie di Bio-PET, che vengono separate dal flusso dei rifiuti per il riciclaggio dei materiali.

2.3 EMISSIONI DA INCENERIMENTO DEI BIO-POLIMERI

La “composizione bio-based” dei bio-polimeri è il motivo per cui la maggior parte degli studi presuppone un potenziale inquinante teoricamente basso derivante dai gas di combustione eventualmente prodotti. Un'attenzione più critica è rivolta agli additivi, solitamente sconosciuti, spesso contenuti nei bio-polimeri, che avranno un ruolo ancora più significativo tra i bio-polimeri di 3^a generazione. Non esiste ancora un'esperienza pratica di questo tipo con i bio-polimeri, ma le bio-plastiche compostabili certificate, ad esempio, secondo la norma EN 13432, dovrebbero avere dei vantaggi grazie ai bassi livelli controllati di metalli pesanti ed altri componenti ecologicamente dannosi.

2.3.1. METODO DI INDAGINE:

Per simulare la combustione dei campioni di bio-polimero è stato utilizzato l'apparecchio VCI, composto da:

- [1]. Aria sintetica
- [2]. Valvola di controllo
- [3]. Misuratore di portata del fluido
- [4]. Apparato VCI con unità di controllo
- [5]. Porta di campionamento
- [6]. Tubo di fuoco con tappo di lana al quarzo con unità di deflessione
- [7]. Tubi dell'assorbitore XAD-2
- [8]. Raffreddamento ad acqua
- [9]. Tubo con carbone attivo
- [10]. Sacca di gas con valvola e setto

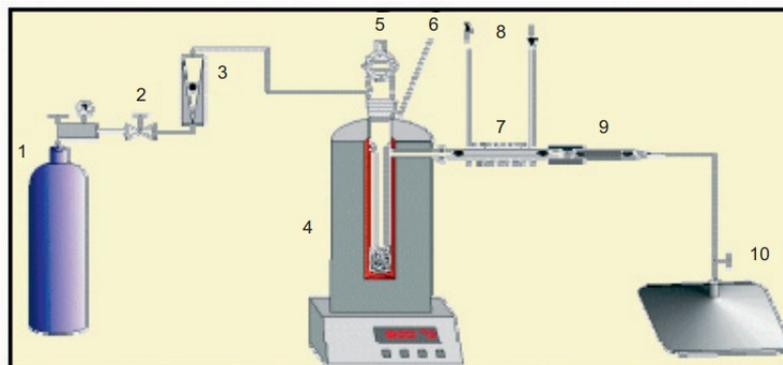


Figura n. 6 - Apparecchio di misurazione per studiare il comportamento delle emissioni durante l'incenerimento di bio-polimeri. [4]

2.3.2 COMBUSTIONE DI CAMPIONI DI BIOPOLIMERO

Il materiale è stato bruciato in condizioni controllate per quanto riguarda la massa, la ventilazione e la temperatura del campione mediante autocombustione nel forno preriscaldato dell'apparecchio.

Durante la prova sono stati impostati i seguenti parametri individuali:

- Temperature durante la combustione del provino: 800°C
- Ventilazione: 280 ml di aria sintetica/min
- Peso iniziale del campione: circa 5 mg
- Periodo di campionamento: 4min

2.3.3 ASSORBIMENTO DEI FUMI

I fumi sono stati campionati mediante una composizione adsorbente universale costituita da resina XAD-2 purificata (un copolimero di polistirene-divinilbenzene) e da carbone attivo seriale a valle nella zona di scarico dei gas dell'apparato VCI.

Il tubo di adsorbimento XAD-2 è stato raffreddato con acqua per migliorare l'efficienza di adsorbimento.

2.3.4 DESORBIMENTO E RIGENERAZIONE DEI FUMI

Gli adsorbenti caricati sono stati desorbiti mediante desorbimento con solvente. A tale scopo i materiali (resina XAD-2 e carbone attivo) sono stati trasferiti in fiale campione riempite con la corrispondente soluzione di desorbimento. Quindi le fiale chiuse sono state lasciate riposare 24 ore per stabilire l'equilibrio di desorbimento.

Il solvente utilizzato per lo XAD-2 è stato il diclorometano, un solvente efficiente per gli idrocarburi policiclici aromatici (PAK), mentre per il carbone attivo è stato utilizzato il solvente universale disolfuro di carbonio.

2.3.6 RISULTATI

Per garantire la completa combustione dei rifiuti la Direttiva Europea 2007/76/CE impone, a tutti gli impianti, di mantenere i gas di incenerimento o coincenerimento ad una temperatura di almeno 850°C per almeno due secondi.

Dalle prove, con una temperatura di 800°C, sono stati ottenuti i seguenti risultati dettagliati:

- Armonizzazione crescente delle combinazioni chimicamente diverse dei fumi emessi.
- Atomizzazione crescente dei frammenti di carburante → scomparsa della relazione strutturale tra polimero combusto ed emissioni di combustione.
- La combinazione degli elementi determina principalmente quali prodotti della combustione si formano, la struttura del polimero svolge un ruolo secondario.
- Spettro di prodotti: composti quasi esclusivamente aromatici.
- Conclusione: la formazione degli aromatici si basa soprattutto su reazioni di frammenti di catena più piccoli tra loro → ricombinazione in prodotti di ciclizzazione.
- Sostanze (eco)tossicologiche note:
 - Gli aromatici: benzene (T, K+M), toluolo (X_n , R) e naftalene (X_n , N).
 - La creazione si verifica in quasi tutti i bio-polimeri.
 - L'incenerimento dei bio-polimeri crea anche sostanze pericolose per la salute e per l'ambiente.
 - La tipologia dei fumi è determinata dalla composizione elementare dei polimeri.
La base della materia prima è insignificante.

Queste misurazioni fanno presumere che il comportamento della combustione dei bio-polimeri corrisponda a quello delle plastiche tradizionali. Ciò significa che, come per le plastiche convenzionali, il potere calorifico e termico e le emissioni risultanti dipendono esclusivamente dalla composizione dei materiali, cioè dalla struttura chimica degli elementi coinvolti, e che le fonti delle materie prime non hanno alcuna influenza.

Inoltre, dal punto di vista ingegneristico, non sono necessarie modifiche o adattamenti alle tecnologie di incenerimento esistenti per incenerire i bio-polimeri separatamente o insieme alle plastiche tradizionali.

Il vantaggio sostanziale dell'incenerimento dei bio-polimeri, tuttavia, è che il contenuto dei materiali bio-based determina la neutralità della produzione di energia in termini di CO₂.

3. Bio-POLIETILENE

Il PE è il materiale termoplastico più comune al mondo, con il maggior volume di produzione e consumo nel globo.

L'elevata tenacità, la duttilità, la bassa permeabilità e conduttività elettrica, l'eccellente resistenza chimica e la facilità di lavorazione rendono questo materiale idoneo per diverse applicazioni e prodotti. [37]

Tuttavia, la produzione di PE dal petrolio prevede il cracking catalitico a vapore o fluido della nafta, richiedendo una grande quantità di energia e di costi. Recando gravi danni all'ambiente tramite le elevate emissioni di gas serra e contribuendo, in ultima analisi, al riscaldamento globale. [40] Inoltre, questi prodotti vengono introdotti nell'ecosistema come rifiuti solidi alla fine del loro ciclo di vita utile, inquinando l'ambiente perché in condizioni ambientali naturali non si decompongono. [23]

Sono stati compiuti sforzi per ridurre i danni ambientali del PE derivanti dai processi di produzione e degradazione, il che ha portato all'esplorazione del Bio-PE come alternativa "verde". [40]

Il Bio-polietilene è una plastica bio-based non biodegradabile, ma riciclabile al 100%. Ha la stessa composizione chimica del polietilene tradizionale, ma viene prodotto a partire da risorse rinnovabili come canna da zucchero, mais o altre materie prime/biomasse di origine vegetale.

Il sequestro di carbonio da parte della pianta in fase di crescita (materia prima rinnovabile) compensa le emissioni generate durante la produzione e il ciclo di vita del Bio-PE, rendendolo neutro dal punto di vista delle emissioni di carbonio o addirittura negativo in alcuni casi.

Il lavoro pionieristico nel settore della canna da zucchero per la produzione di Bio-etanolo è stato effettuato dalla società petrolchimica brasiliana *Braskem*, che nel 2007 ha commercializzato il primo Bio-PE al mondo. [40]

Ad oggi 2/3 della biomassa formata da canna da zucchero deriva dalle regioni subtropicali, il Brasile è il leader mondiale.

Il Bio-etanolo, solitamente ottenuto dalla fermentazione alcolica delle biomasse, viene convertito in Bio-etilene tramite disidratazione o pirolisi e gassificazione. Successivamente viene polimerizzato per produrre Bio-PE.

Il Bio-etilene è sostanzialmente uguale all'etilene.

Le prestazioni del Bio-PE sono identiche a quelle del PE ricavato dal petrolio e possono essere utilizzate in modo intercambiabile senza compromettere il prodotto finale.

Il prezzo di 1 Kg di Bio-PE è di circa il 30% superiore al PE tradizionale. [30]

Ogni anno vengono prodotte 200 mila tonnellate/anno di Bio-PE.

Tabella n. 5 – Composizione dei sacchetti per rifiuti in PE e Bio-PE. [23]	
COMPOSIZIONE	PE e Bio-PE
Carbonio (%)	87.10
Idrogeno (%)	8.45
Azoto (%)	0.21
Zolfo (%)	0.20
Carbonio (%)	3.96
Umidità (%)	0.51
Ceneri (%)	0.45

3.1 PROCESSO DI PRODUZIONE DEL BIO-PE

1. Produzione materie prime

- Vengono coltivate piante come la canna da zucchero, mais, grano o altre colture ricche di zucchero o amido.
- Canna da zucchero: materia prima più utilizzata per la produzione di Bio-etanolo, grazie alla sua elevata resa per ettaro e al suo contenuto zuccherino.
La media della resa è di 90 t/ha. [23]
- La canna da zucchero, dopo essere stata raccolta, viene sottoposta ai seguenti processi:
 - [1]. Pulitura
 - [2]. Affettatura
 - [3]. Sminuzzatura
 - [4]. Macinazione
- Al termine di questi processi, si ottengono due prodotti:
 - [1]. Succo di biomassa = succo che contiene zuccheri, precisamente il saccarosio, un semplice disaccaride (materia prima di 1^a generazione).
 - [2]. Bagassa = sottoprodotto della fibra della canna da zucchero (materia prima di 2^a generazione).
- La produzione di 1 kg di biomassa richiede 1,45 kg di canna da zucchero, 0,02 kg di idrossido di calcio, 0,05 kWh di energia elettrica, 0,84 kg di vapore e genera 1,37 ml di acque reflue. [23]

2. Produzione Bio-etanolo

- I prodotti ricavati dalla canna da zucchero vengono fermentati anaerobicamente per ottenere Bio-etanolo C_2H_6O
- Il processo di fermentazione può produrre:
 - [1]. fino al 12-13% di Bio-etanolo dal succo di biomassa;
 - [2]. fino al 5% di Bio-etanolo dalla bagassa, a causa della scarsa disponibilità della molecola di zucchero.
- La produzione di 1 kg di Bio-etanolo richiede 3,72 kg di biomassa, 0,08 kWh di energia elettrica, 2,49 kg di vapore e 0,03 kg di sostanze chimiche. [13]
- Il Bio-etanolo viene distillato, ottenendo una soluzione azeotropica di Bio-etanolo idrato al 95,5% in volume.

3. Produzione Bio-etilene

- Il Bio-etanolo idrato viene disidratato, cioè viene tolta la molecola d'acqua, per ottenere il Bio-etilene.
- Il processo avviene facendo passare il Bio-etanolo attraverso un catalizzatore a base di allumina ad una temperatura compresa tra i 300-400°C.
- La produzione di 1 kg di Bio-etilene richiede circa 1,75 kg di Bio-etanolo, 3,7 kWh di energia elettrica, 1,8 kg di vapore, 0,85 kg di olio pesante e 0,8 kg di acqua. [10, 12]
- Il Bio-etilene chimicamente è uguale all'etilene tradizionale.

4. Polimerizzazione del Bio-etilene

- Il Bio-etilene viene polimerizzato in modo simile all'etilene tradizionale, formando le varie tipologie di Bio-polietilene.

[1]. Polimerizzazione a Bassa Pressione:

→ Catalizzatori: utilizza catalizzatori Ziegler-Natta (composti da metalli di transizione come il titanio).

→ Condizioni: a temperatura ambiente e bassa pressione (~1-10 atm).

→ Polimero prodotto: Bio-HDPE.

[2]. Polimerizzazione ad Alta Pressione:

→ Catalizzatori: Non richiede catalizzatori speciali (reazione radicalica).

→ Condizioni: Alte pressioni (~1000-3000 atm) e temperature elevate (~200-300°C).

→ Polimero prodotto: Bio-LDPE.

[3]. Polimerizzazione in Fase Gas:

→ Catalizzatori: Metalloceni o altri catalizzatori speciali.

→ Condizioni: Moderata pressione e temperatura.

→ Polimero prodotto: Bio-LLDPE.

5. Processamento del Bio-PE

- Estrusione: Il Bio-PE viene riscaldato ed estruso per formare pellet.
- Compounding: i pellet vengono miscelati con additivi per migliorare le proprietà del materiale, come ad esempio stabilizzatori UV, coloranti, ecc.
- Formatura:
 - **Stampaggio a iniezione**: per produrre articoli rigidi come contenitori.
 - **Estrusione a soffiaggio**: per produrre film e fogli flessibili.

3.2 TIPI DI BIO-PE

La composizione chimica del Bio-PE è la stessa del PE tradizionale: $(-C_2H_4-)_n$.

Il polimero è costituito da catene di $-CH_2-$ ripetute più volte.

Dalla polimerizzazione del Bio-etilene si riescono ad ottenere diverse tipologie di Bio-PE, ciascuna con proprietà specifiche in base alla sua applicazione. [30]

a. Bio-HDPE (Bio-Polietilene ad alta densità):

- Proprietà: ha un basso grado di ramificazione a catena corta e lineare (circa 7 rami per 1000 atomi di carbonio), favorendo un impacchettamento compatto. Queste caratteristiche conferiscono al materiale un'elevata densità e rigidità, con una bassa permeabilità ai gas e all'umidità.
- Applicazioni: utilizzato per prodotti rigidi come bottiglie, taniche, tubazioni e contenitori per alimenti.

b. Bio-LDPE (Bio-Polietilene a bassa densità):

- Proprietà: ha un alto grado di ramificazione a catena corta più ramificazione a catena lunga (circa 60 rami per 1000 atomi di carbonio), impedendo un impacchettamento denso. Queste caratteristiche conferiscono al materiale una struttura più flessibile e un'elevata trasparenza.
- Applicazioni: utilizzato per prodotti più flessibili come film plastici, sacchetti per la spesa e pellicole da imballaggio.

c. Bio-LLDPE (Bio-Polietilene lineare a bassa densità):

- Proprietà: ha un alto grado di ramificazione a catena corta. Questa caratteristica conferisce al materiale un'elevata flessibilità e resistenza a trazione.
- Applicazioni: utilizzato per prodotti più flessibili come film per imballaggi, sacchetti resistenti e pellicole stretch.

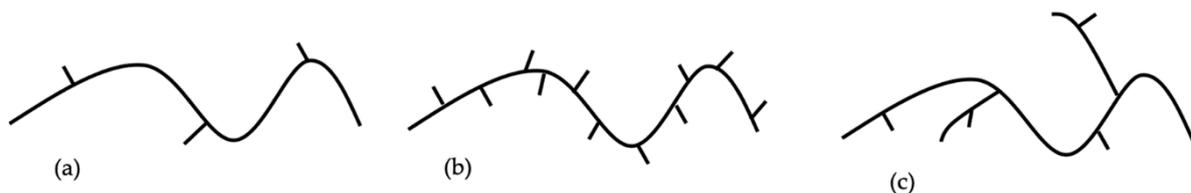


Figura n. 7 - Struttura chimica generale dei bio-polimeri: (a) Bio-HDPE, (b) Bio-LDPE e (c) Bio-LLDPE. [30]

3.3 APPLICAZIONI BIO-PE

Il Bio-PE, come già riportato, è chimicamente identico al PE; pertanto, anch'esso trova spazio in varie applicazioni. Di seguito vengono riportate le principali:

1. Imballaggi:

- Film per imballaggio: utilizzato per confezionare prodotti alimentari e prodotti industriali.
- Sacchetti per la spesa: molti supermercati e rivenditori offrono sacchetti realizzati in Bio-PE come alternativa ai sacchetti di plastica tradizionali.
- Pellicole termoretraibili: usate per imballare e proteggere prodotti, soprattutto in ambito alimentare.

2. Contenitori:

- Bottiglie: utilizzate per acqua ed altri liquidi.
- Flaconi e tubi: impiegati per cosmetici, prodotti per la cura personale e detergenti.
- Vaschette e contenitori alimentari: utilizzati per il packaging di alimenti.

3. Agricoltura:

- Film per pacciamatura: utilizzati per coprire il terreno, aiutando a ridurre le erbacce e a mantenere l'umidità.
- Tubi per irrigazione: utilizzati nei sistemi di irrigazione agricola.

4. Industria e Edilizia:

- Tubi e condotti: usati in applicazioni idrauliche e di conduttura.
- Componenti per automobili: per parti di rivestimento ed altri componenti.

5. Elettronica:

- Custodie e rivestimenti: utilizzati per realizzare coperture e componenti protettivi per dispositivi elettronici.

6. Prodotti per la casa

- Sacchetti per rifiuti: spesso realizzati in Bio-PE per ridurre l'impatto ambientale dei sacchetti di plastica tradizionali.
- Articoli monouso: piatti, bicchieri, posate e altri articoli usa e getta.
- Attrezzature sportive: come borse, scarpe e altri accessori realizzati con materiali plastici.
- Giochi e giocattoli

3.4 CARATTERIZZAZIONE DELLA RESINA PE

Il Bio-PE è stato sviluppato per emulare le proprietà della sua controparte a base fossile: ha le stesse proprietà, la stessa durata di vita, le stesse applicazioni e le stesse capacità di riciclo.

3.4.1 SPETTROSCOPIA INFRAROSSA A TRASFORMATATA DI FOURIER - FTIR

Per analizzare la struttura molecolare delle resine è stato utilizzato uno spettrometro ATR (Perkin Elmer Frontier, Waltham, MA, USA).

Gli spettri sono stati raccolti nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 4.000 cm^{-1} e 650 cm^{-1} , con una risoluzione di $1,0\text{ cm}^{-1}$, e poi normalizzati al picco associato allo stiramento del legame C-H a 2915 cm^{-1} .

Prima della caratterizzazione di ciascun campione, l'accessorio ATR in diamante è stato pulito con metanolo ed è stata eseguita una scansione di fondo.

Il numero di accumuli per ogni campione è stato di 16 scansioni per spettro.

La forza totale applicata tra il cristallo ATR e il campione era superiore a 100 N.

3.4.2 ANALISI TERMOGRAVIMETRICA - TGA

Per eseguire l'analisi termica è stato utilizzato un TA Instruments TGA 500® (TA Instruments, New Castle, DE, USA).

La degradazione termica dei campioni in termini di perdita di peso a temperature più elevate è stata valutata mediante TGA e DTGA.

Per lo studio sono stati utilizzati campioni con una massa compresa tra 10 e 20 mg.

L'analisi è stata eseguita utilizzando un piatto di platino in azoto (N_2) come gas inerte (60 mL/min).

La temperatura variava da 30°C a 670°C , con una velocità di riscaldamento di 5°C/min .

3.4.3 CALORIMETRIA A SCANSIONE DIFFERENZIALE - DSC

Le temperature di fusione e cristallizzazione delle resine sono state misurate dai termogrammi utilizzando il TA Instruments DSC Q2000® (TA Instruments, New Castle, DE, USA).

Sono stati pesati e analizzati vari campioni, circa 5-6 mg ognuno, utilizzando un piatto di alluminio in azoto (N_2) come gas di trasporto (50 mL/min).

La temperatura variava da -20°C a 170°C con una velocità di riscaldamento/raffreddamento di 10°C/min. [6]

Prima di iniziare ogni analisi la temperatura è stata mantenuta a 170°C per 3 minuti per cancellare la storia termica dei polimeri.

La percentuale di cristallinità dei polimeri PE è stata calcolata secondo l'Eq. 1, dove:

- %X = cristallinità (%)
- ΔH_{fus_i} = entalpia di fusione del campione di PE calcolata dall'integrazione dell'endoterma di fusione DSC (J/g)
- $\Delta H_{fus_{100\% \text{ cristallino}}} = 293 \text{ J/g}$ = entalpia di fusione per un campione cristallino al 100%

$$\%X = \frac{\Delta H_{fus_i}}{\Delta H_{fus_{100\% \text{ cristallino}}}} \cdot 100 \quad \text{Eq.1}$$

3.4.4 CONTENUTO DI CARBONIO BIO-BASED

Il contenuto di carbonio bio-based è stato valutato attraverso l'AMS e l'IRMS, secondo la norma ASTM D6866. [32]

L'analisi è stata eseguita presso il laboratorio Beta Analytic Testing Laboratory (FL, USA).

La percentuale di isotopo del radiocarbonio (¹⁴C) si riferisce al carbonio proveniente da risorse rinnovabili piuttosto che da fonti di combustibili fossili. Pertanto, la percentuale di questo isotopo del carbonio nel campione rispetto al contenuto totale di carbonio organico è indicativa del contenuto di carbonio rinnovabile.

3.4.5 ANALISI TERMICA DEL PE

Le condizioni di lavorazione per l'estrusione per fusione sono determinate in base alle proprietà termiche delle resine, come la T_m e la T_{deg}, e sono state valutate attraverso l'analisi termica del PE.

La degradazione termica delle resine di PE è stata analizzata mediante TGA. I termogrammi delle resine di PE sono caratteristici di quelli presenti in letteratura [27] in termini di variazione della percentuale di peso e della sua derivata perdita di peso con la temperatura, come evidenziato dalla Fig. 8.

Il rilascio di sostanze volatili non è stato osservato tra i termogrammi TGA, il che conferma la purezza dei campioni di resina e supporta ulteriormente i risultati ottenuti dall'analisi FTIR.

Dunque, la perdita di massa al di sopra dei 350°C è attribuita alla decomposizione del polimero PE, ciò è supportato dalla presenza di un solo picco nella curva derivata.

Inoltre, il campione a base biologica Bio-PE-20 ha presentato un modello di degradazione termica simile a quello del campione a base petrolifera PE-30, che ha un valore simile di densità volumetrica.

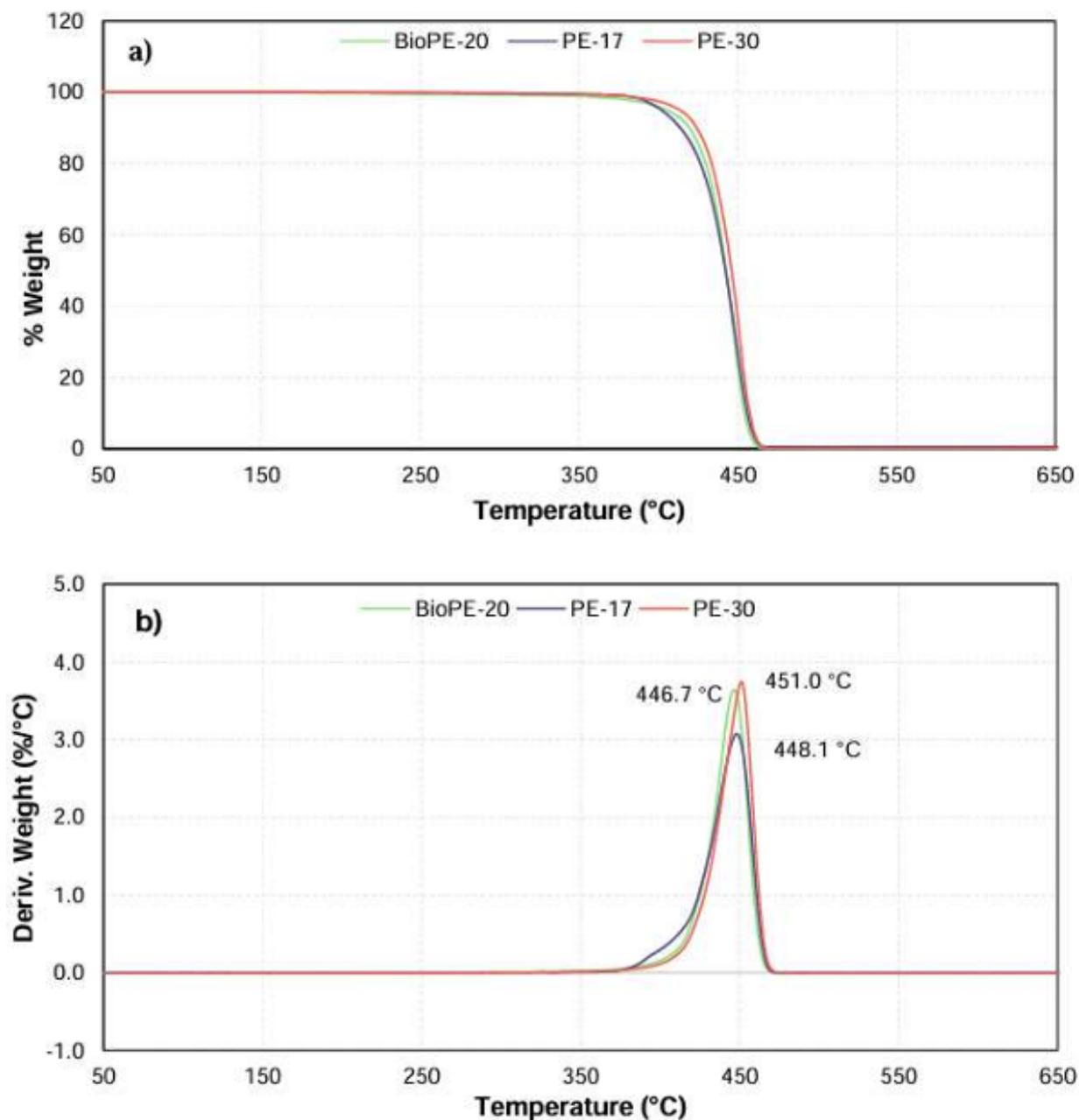


Figura n. 8 - I termogrammi del PE sono mostrati nelle curve (a) TGA e (b) DTGA. [36]

Da queste curve sono state determinate le temperature cruciali di lavorazione, come la temperatura di inizio della degradazione nella Tab. 6.

Le resine PE hanno mostrato temperature di degradazione termica comprese tra 447°C e 451°C, che concordano con i valori tra 335°C e 450°C.

Più specificamente, tutte le resine PE hanno presentato temperature di degradazione simili e temperature di picco per la degradazione alla massima perdita di peso, indicando un'elevata somiglianza nella loro idoneità all'estrusione per fusione.

La resa in carbone della massa residua di tutte le resine PE a 650°C è inferiore allo 0,5% in peso.

Tabella n. 6 - Comportamenti di degradazione termica delle resine PE.			
CAMPIONE	T_{onset} (°C)	T_{picco} (°C)	Δm (% in peso)
Bio-PE-20	425.6	446.7	99.9
PE-17	422.0	448.1	99.5
PE-30	423.9	451.0	99.8

(T_{onset} = Temperatura di inizio della transizione)

Le temperature di fusione e cristallizzazione delle resine PE sono state determinate con la tecnica DSC. La Fig. 9 mostra le curve di fusione e cristallizzazione per ciascuna resina PE e le temperature di picco per la T_m e la T_c sono state misurate come indicato nella Tab. 7.

In generale, le resine hanno presentato valori caratteristici di T_m intorno ai 130°C e di T_c intorno ai 115°C per il PE.

Il Bio-PE-20 ha mostrato una T_m simile a quella del PE-30 a base di petrolio, che ha una densità comparabile.

Le somiglianze tra i comportamenti di queste resine PE (basate su TGA e DSC) indicano che le loro condizioni di lavorazione in tessuti non tessuti stese per fusione saranno simili.

Tabella n. 7 - Risultati delle curve DSC per i campioni di PE.			
CAMPIONE	T_{fusione} (°C)	T_{cristallizzazione} (°C)	CRISTALLINITA' (%)
Bio-PE-20	130.0	118.4	66.4
PE-17	127.9	114.4	59.0
PE-30	129.2	116.0	63.8

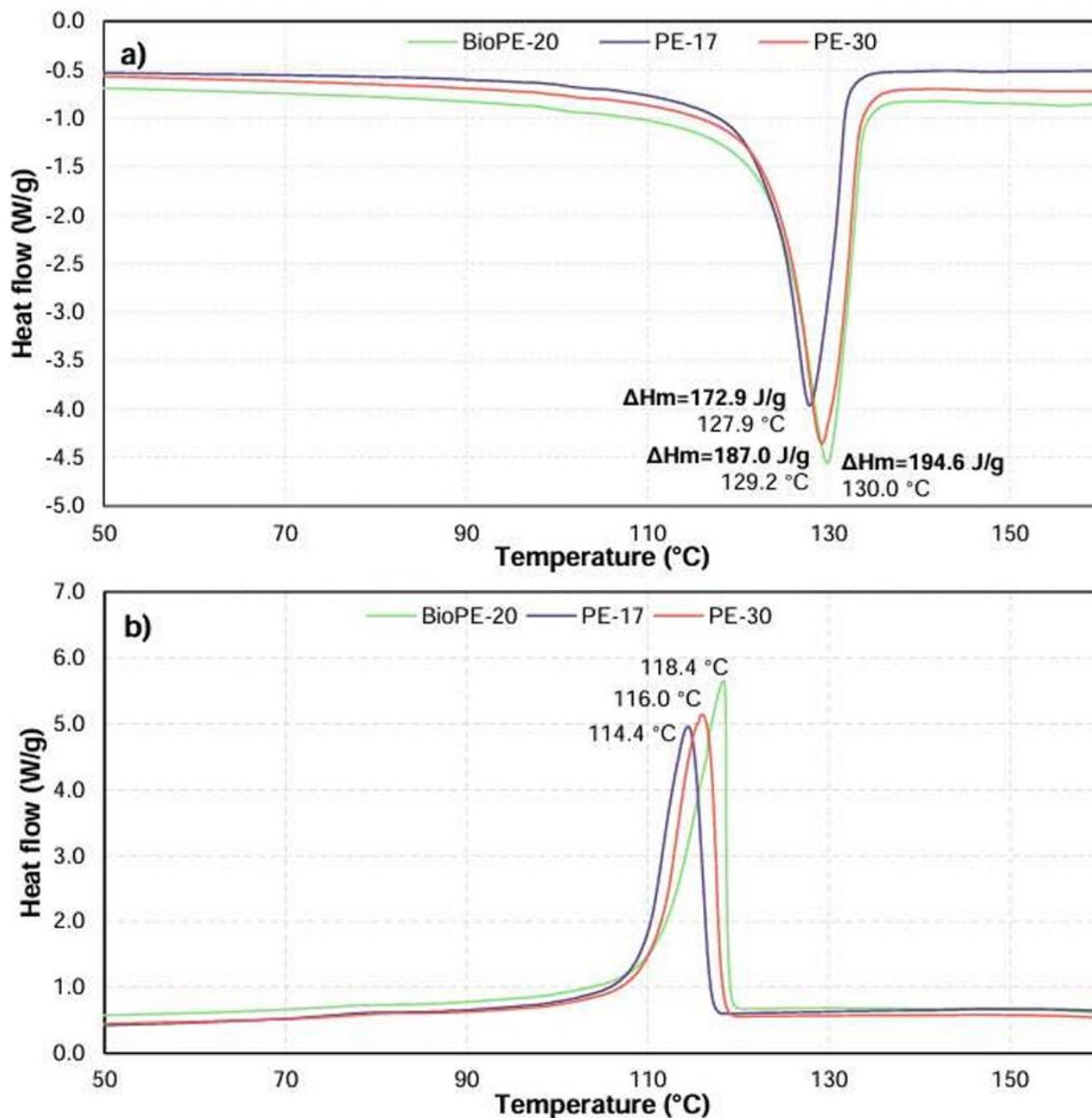


Figura n. 9 - Curve di fusione (a) e di cristallizzazione (b) DSC di un polimero fuso, tenuto a 170°C per 3 minuti prima di essere raffreddato a 10°C/min e poi riscaldato a 10°C/min. [36]

In particolare, le temperature di fusione e di degradazione consentono di determinare le condizioni per il trattamento termico delle resine PE. Poiché questi polimeri presentano picchi di fusione intorno ai 130°C e l'inizio della degradazione si verifica intorno ai 423°C, le temperature comprese tra 180°C e 230°C sono adatte alla filatura per fusione di queste resine. Inoltre, come evidenziato nella Fig. 9.

4. PROVE SPERIMENTALI

In questa parte del lavoro di tesi, viene valutata, sperimentalmente, una particolare applicazione di un bio-polimero. Nello specifico viene testata l'efficienza di rimozione del particolato aerodisperso ad opera di filtri elettrofilati in acido polilattico.

4.1 PARTICOLATO ATMOSFERICO - PM

Il particolato atmosferico (PM) rappresenta un gruppo eterogeneo di particelle solide o liquide sospese nell'atmosfera, che comprende una miscela complessa di composti organici, metalli e particelle di terreno o polvere.

La classificazione dei PM è varia e comprende le dimensioni delle particelle, la fonte di origine, la composizione chimica e gli effetti associati. Per quanto riguarda la classificazione basata sul range dimensionale, i PM sono tipicamente classificati in relazione al loro diametro aerodinamico.

Il diametro aerodinamico è definito come il diametro di una sfera con densità unitaria che presenta le stesse caratteristiche aerodinamiche, cioè la velocità di sedimentazione finale della particella. Viene utilizzato per esprimere il comportamento aerodinamico di particelle di forma irregolare, come misura di lunghezza, per poterle confrontare in modo più efficace.

Le due categorie principali sono:

- **PM_{2.5}** (Particelle fini): particelle con diametro aerodinamico inferiore a 2,5 µm. Hanno un elevato potenziale di penetrazione nel sistema respiratorio, entrano negli alveoli.
- **PM₁₀** (Particelle grossolane): particelle con diametro aerodinamico compreso tra 2,5 e 10 µm. Più grandi rispetto le PM_{2,5} ma hanno comunque la capacità di penetrare nel tratto respiratorio fino ad arrivare ai polmoni.

Minore è la dimensione delle particelle, maggiore è la superficie specifica, ovvero, il particolato fine riesce ad adsorbire e assorbire più sostanze tossiche.

Le fonti di PM sono diverse:

- **Origini naturali:** polvere, sale marino, incendi boschivi ed eruzioni vulcaniche.
- **Origini artificiali:** emissioni del traffico, combustione del carbone, processi industriali e combustione della biomassa.

L'esposizione al PM avviene principalmente per inalazione causando vari problemi alla salute umana. L'esposizione, a breve termine, può peggiorare condizioni come l'asma e la bronchite, mentre a lungo termine, può portare a problemi cardiovascolari, disturbi respiratori e cancro ai polmoni.

4.2 MATERIALI

4.2.1 ACIDO POLILATTICO - PLA

Il PLA è definito bio-polimero per la sua derivazione da materie prime rinnovabili e per la sua biodegradabilità.

Il PLA viene sintetizzato a partire dall'acido lattico, prodotto dalla fermentazione di zuccheri derivati da amidi vegetali, come mais, manioca e canna da zucchero.

È solubile in solventi organici come benzene, tetraidrofurano e acetone.

Uno degli ostacoli che impediscono la crescita del mercato del PLA è il costo associato alle fasi intermedie della reazione di condensazione dell'acido lattico in un composto chirale (dimero dell'acido lattico).

Il PLA ha un'ampia gamma di applicazioni nella nostra vita quotidiana. Questo materiale biodegradabile viene utilizzato per vari scopi, tra cui imballaggi, bicchieri e posate compostabili, filamenti per stampa 3D.

4.2.1.1 CARATTERISTICHE PLA

Il PLA ha una temperatura di transizione vetrosa di 55°C, può comportare una riduzione della massa molare, delle proprietà meccaniche e della degradazione in fase di lavorazione.

La temperatura di fusione, che dipende dalla composizione e dalle masse molari, varia da 160°C a 180°C, per questo motivo è fondamentale selezionare la temperatura di lavorazione appropriata, poiché le alte temperature possono indurre la degradazione termica del PLA.

Il PLA presenta lo stesso modulo di resistenza alla trazione, barriera agli aromi e agli odori del PE, del PET o del PVC, mentre la stabilità alla temperatura e la lavorabilità del PS.

Un'altra caratteristica importante del PLA è che non è tossico per la salute umana.

Tra i suoi principali svantaggi distinguiamo la fragilità e la scarsa resistenza alla temperatura.

Alcune delle misure adottate per affrontare i limiti del PLA sono la miscelazione con altri polimeri biodegradabili, la copolimerizzazione, la plastificazione mediante l'aggiunta di modificatori chimici che possono portare all'estensione della catena, nonché alla ramificazione e alla reticolazione. [3, 14]

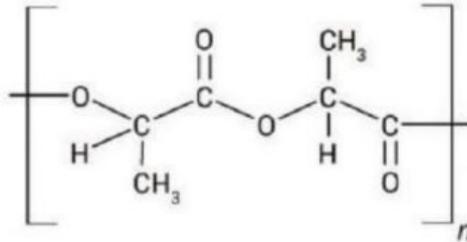


Figura n. 10 - Struttura molecolare del PLA.

Il PLA utilizzato, per la realizzazione dei filtri che sono stati testati, è stato il Luminy® LX930, sotto forma di pellet amorfi con le seguenti caratteristiche:

- Densità: 1,24 g/cm³
- Temperatura di fusione: 130°C
- Temperatura di transizione vetrosa: 60°C
- Resistenza alla trazione: 40 Mpa
- Allungamento a rottura: < 5%

La massa molare del PLA non è riportata nella scheda tecnica. In ogni caso, in letteratura la massa molare del PLA sotto forma di pellet è compresa tra 106.000 e 186.000 g/mol. [26]

4.2.2 SOLVENTE

La soluzione per realizzare il filtro, utilizzata nel processo di elettrofilatura, è stata ottenuta sciogliendo i polimeri in un solvente.

Come solvente, è stato utilizzato acetone (Sigma Aldrich, ≥ 99,5%).

L'acetone è un buon solvente per il metodo di elettrofilatura grazie alla sua conduttività e costante dielettrica relativamente elevate combinate con una tensione superficiale relativamente bassa. [11]

4.3 TEST EFFICIENZA DI FILTRAZIONE PM

Per testare l'efficienza di rimozione del PM da parte dei filtri elettrofilati in PLA, abbiamo utilizzato un setup composto da una stanza di 12 m³ con due ventilatori rotanti e un nebulizzatore (Medisana) alimentato con una soluzione di NaCl al 3% p/V (Fig. 11).



Figura n. 11 - Allestimento del setup e misurazione della concentrazione di PM prima della filtrazione.

La stanza è collegata all'esterno tramite un tubo in PVC nel quale è possibile posizionare il filtro in esame utilizzando un supporto in PLA del diametro di 6 cm stampato in 3D (Fig. 13).

L'aria viene aspirata, dalla stanza all'esterno, tramite una ventola, collegata al tubo in PVC, che genera un flusso di 12 m³/h (200 l/min).

Il nebulizzatore disperde nell'aria goccioline microscopiche della soluzione (aerosol solino), quando l'acqua evapora lascia le particelle di NaCl in sospensione, generando PM nell'aria.

Per misurare la concentrazione di PM all'interno e all'esterno della sala prove vengono utilizzati due contatori di particelle Trotec BQ21 (Fig. 12). Il contatore di particelle utilizza la tecnologia di misurazione della diffusione della luce per rilevare e quantificare il particolato: le particelle diffondono la luce generata da un laser e il rilevatore del dispositivo cattura questa luce diffusa.



Figura n. 12 - Contatore di particelle Trotec BQ21.



Figura n. 13 - Supporto del filtro in PLA stampato in 3D.

L'intensità della luce diffusa è direttamente proporzionale alla dimensione e alla concentrazione delle particelle. Il dispositivo ha due canali, progettati per misurare particelle di dimensioni rispettivamente di $2,5 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$; queste dimensioni corrispondono alle categorie riconosciute a livello internazionale di polveri sottili $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10} .

Il test inizia quando il nebulizzatore viene acceso all'interno della stanza e la porta viene chiusa.

I due contatori di particelle Trotec BQ21 sono posti uno all'interno della stanza e uno all'esterno dal tubo in PVC per misurare le concentrazioni di $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10} in ingresso e in uscita dal filtro.

La prova ha la durata di 5 minuti, ma dopo 10 secondi, dall'inizio del test, il nebulizzatore viene spento per non superare la concentrazione massima rilevabile dallo strumento, pari a $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, all'interno della stanza.

Prima del test, la caduta di pressione generata dal filtro è stata misurata con un manometro Trotec TA400. I due tubi del manometro sono stati collegati al tubo in PVC tramite due uscite d'aria, una prima ed una dopo il filtro. In questo modo lo strumento può misurare la pressione a monte e a valle del filtro e calcolare automaticamente la pressione differenziale (Fig. 14).



Figura n. 14 - Manometro Trotec TA400 utilizzato per misurare la pressione differenziale.

I dati dei test sono stati acquisiti dai contatori di particelle Trotec BQ21 ed elaborati per calcolare l'efficienza dei filtri e valutarne le prestazioni.

Da notare che uno strumento ha registrato un valore ogni 0,5 secondi circa e un altro ogni 0,9 secondi circa, abbiamo quindi un numero diverso di valori per la concentrazione interna ed esterna anche se sono stati registrati nello stesso intervallo di tempo.

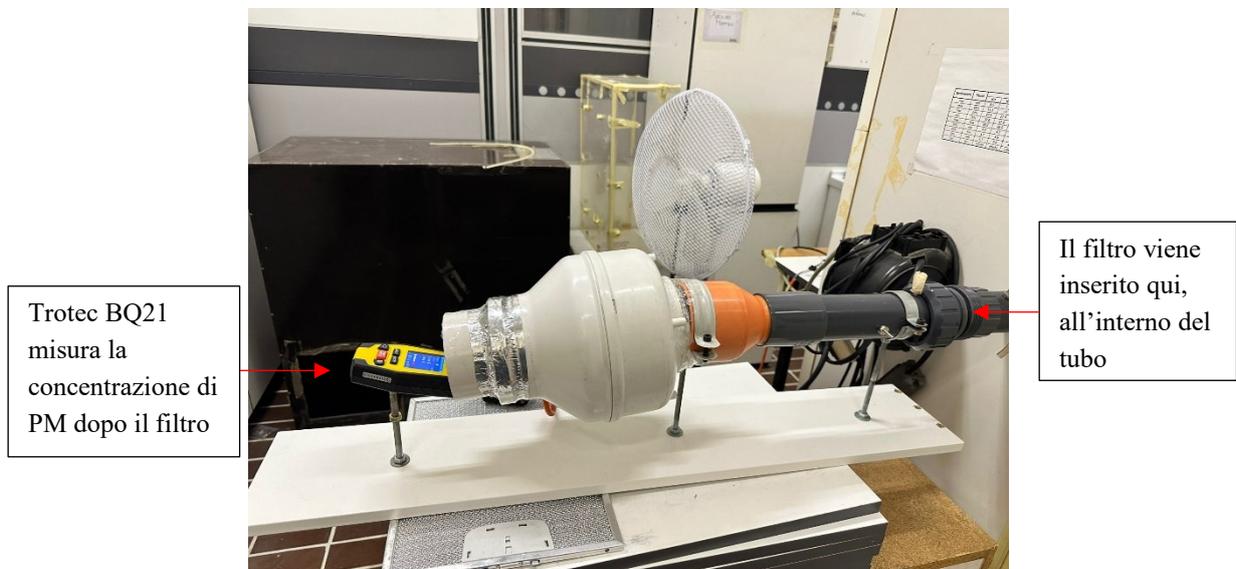


Figura n. 15 - Misurazione della concentrazione di PM dopo la filtrazione.

4.3.1 CALCOLO DELL'EFFICIENZA DI FILTRAGGIO

Per calcolare l'efficienza della filtrazione del particolato, è stato considerato l'incremento della concentrazione all'interno e all'esterno della stanza utilizzando la seguente formula:

$$\text{Efficienza (\%)} = \frac{(\Delta C_{in,f} - \Delta C_{in,i}) - (\Delta C_{out,f} - \Delta C_{out,i})}{(\Delta C_{in,f} - \Delta C_{in,i})} \quad \text{Eq.2}$$

- $C_{in,f}$: concentrazione finale all'interno della stanza
- $C_{in,i}$: concentrazione iniziale all'interno della stanza
- $C_{out,f}$: concentrazione finale all'esterno della stanza
- $C_{out,i}$: concentrazione iniziale all'esterno della stanza

La caduta di pressione è legata al consumo energetico, quindi all'efficienza energetica.

Maggiore è la caduta di pressione più il filtro funge da “tappo”, infatti, il massimo della filtrazione si ottiene quando il punto dove si effettua la misurazione è “chiuso”, implicando una caduta di pressione infinita.

L'ideale sarebbe una caduta di pressione bassa, dove si consuma poca energia, ma con un buon filtraggio.

Combinando l'elevata efficienza di filtrazione e il basso consumo energetico si riescono ad ottenere filtri con prestazioni elevate.

4.4 RISULTATI E OSSERVAZIONI

In questo capitolo vengono riportati e discussi i risultati del test di filtrazione del PM. Nei grafici, dove si nota il picco della concentrazione, equivale a quando è stato spento il nebulizzatore nella sala di prova.

4.4.1 10% PLA / ACETONE

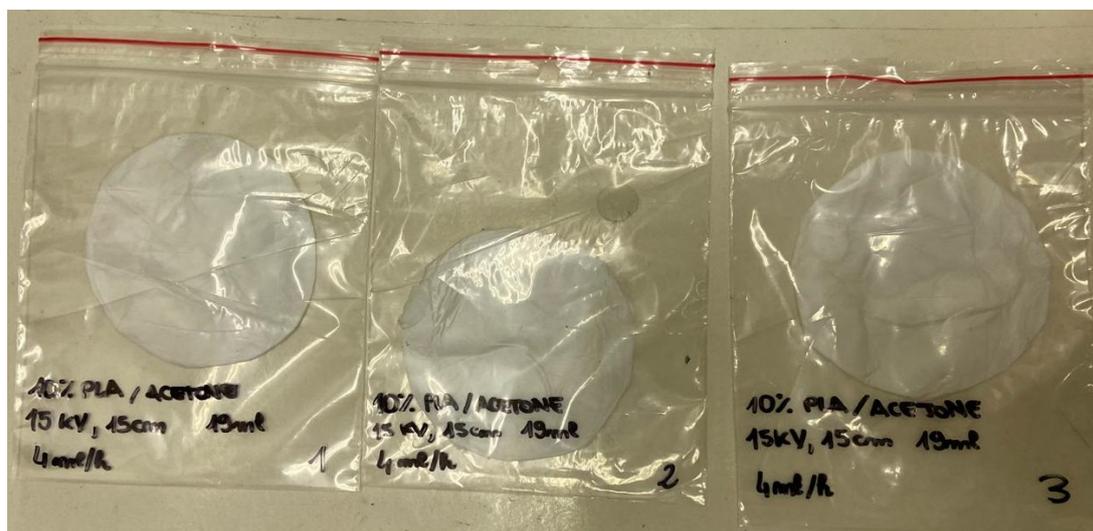
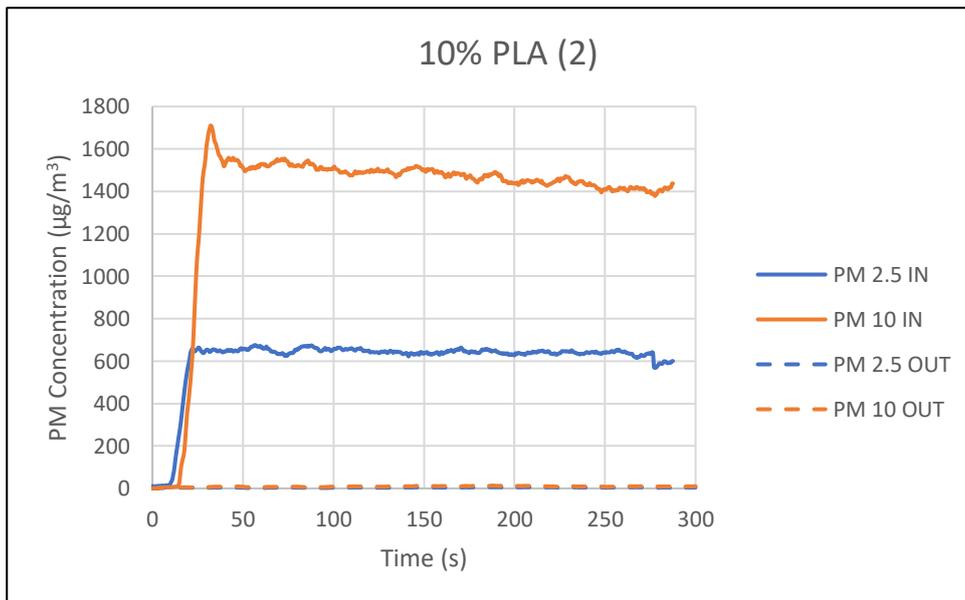
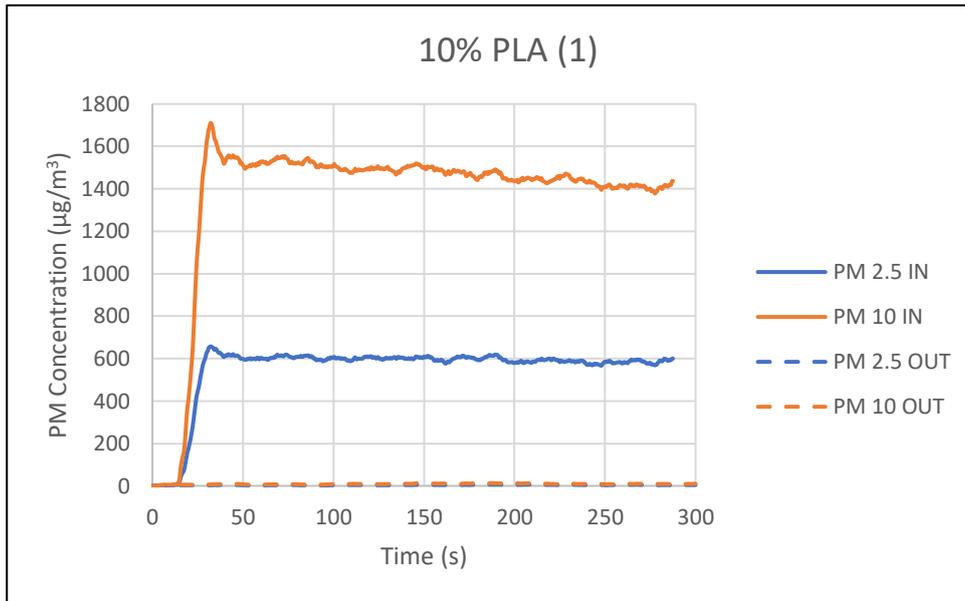


Figura n. 16 - Filtri 10% PLA/ACETONE (1), (2), (3) da sinistra a destra.

Tabella n. 8 - Dati dei provini in PLA.

CAMPIONE	
Concentration (w/w)	10%
PLA	10g
Flow rate	4ml/h
Total	19ml



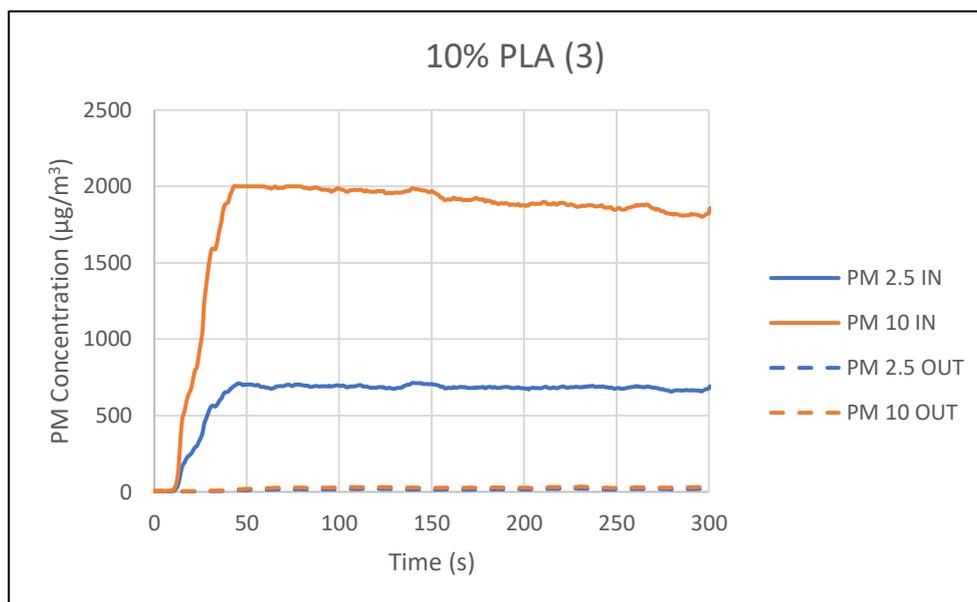


Figura n. 17/18/19 - Andamento della concentrazione per i test sui filtri 10% PLA/ACETONE.

Tabella n. 9 - Efficienza di filtrazione dei filtri 10% PLA/ACETONE.

	Numero Campione	Efficienza di filtrazione		Caduta di pressione (Pa)
		PM 2.5	PM 10	
10% PLA	1	99,33%	99,30%	96
10% PLA	2	100,68%	100,63%	101
10% PLA	3	98,25%	98,92%	88

I filtri realizzati con la soluzione di PLA al 10% hanno dimostrato un'efficienza di rimozione del PM molto elevata su entrambe le frazioni: efficienza di filtrazione e caduta di pressione.

5. CONSIDERAZIONI FINALI

Nel corso di questa tesi sono stati messe a confronto le prestazioni dei bio-polimeri con i loro omologhi tradizionali, esaminando il possibile passaggio dalle plastiche convenzionali a quelle bio-based.

Le plastiche a base di petrolio, fin dalla loro scoperta, hanno contribuito significativamente all'inquinamento, al riscaldamento globale e alla crisi dei rifiuti, con la loro resistenza alla degradazione che ha portato alla proliferazione di detriti plastici negli oceani e nei terreni.

La transizione dai materiali plastici tradizionali ai bio-polimeri rappresenta un cambiamento necessario e ambizioso per affrontare le emergenze ambientali presenti al giorno d'oggi. Sebbene rimangano numerose sfide da superare, i benefici a lungo termine per l'ambiente e la società giustificano l'impegno e gli investimenti necessari.

Con un approccio integrato che combina innovazione tecnologica, politiche mirate e consapevolezza pubblica, possiamo sperare di realizzare un futuro più sostenibile e meno dipendente dalle risorse fossili.

Sensibilizzare i consumatori dovrebbe ridurre i rifiuti di plastica. L'attenzione dovrebbe concentrarsi sulla ricerca di alternative riutilizzabili, abbandonando le plastiche monouso, e sull'eliminazione totale della plastica indesiderata. [41]

Le bio-plastiche, in particolare i bio-polimeri, sono fondamentali negli sforzi globali per ridurre le emissioni di CO₂ e l'utilizzo di fonti fossili.

La maggior parte dei consumatori è incerta sui vantaggi dei prodotti bio-based come alternativa ai prodotti a base di petrolio. Tuttavia, attraverso delle analisi, è stato dimostrato che i compratori sono disposti a pagare il 5-10% in più per le alternative di plastica di origine biologica. [38]

La progettazione di plastiche a zero emissioni, per un'economia circolare, deve seguire un percorso che prenda in considerazione l'intero ciclo di vita e si concentri non solo sulla materia prima, ma anche sul suo destino dopo essere diventata rifiuto. La ricerca deve concentrarsi sull'identificazione di opzioni dell'EoL con il minor impatto ambientale, ottimizzando e potenziando le attuali bio-plastiche con buone prestazioni, come nuovi monomeri in grado di produrre polimeri ad alte prestazioni. [41]

La molteplicità dei bio-polimeri presenti sul mercato, ma anche quelli in fase di sviluppo, renderanno probabilmente più semplice l'utilizzo degli stessi in tutti i settori dove oggi si utilizza plastica tradizionale.

Anche il Bio-PE ha mostrato risultati interessanti, ma gli studi evidenziano che le ricerche future dovranno focalizzarsi sul rendere questo bio-polimero più competitivo dal punto di vista economico.

Come contributo al passaggio ai bio-polimeri, nella presente sperimentazione sono stati svolti dei test, in laboratorio, sull'efficienza di filtrazione del particolato aerodisperso (PM) da parte di filtri in tessuto elettrofilato in PLA, un prodotto bio-based. I risultati di questo studio sono promettenti e indicano che partendo da una soluzione di PLA al 10% si può ottenere un filtro con un'ottima capacità di rimozione del particolato fine, risultando un'ipotesi percorribile per introdurre questi materiali, derivanti da fonti rinnovabili, anche in queste applicazioni.

È bene precisare che, prima di arrivare a conclusioni definitive riguardo l'utilizzo di questo materiale, sono sicuramente necessari ulteriori e più approfonditi studi sperimentali su tale argomento, quali, ad esempio, test di durabilità in opera e biodegradabilità nel fine vita.

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

- [1]. International Organization for Standardization, Switzerland - 2006 - “Environmental Management-Life cycle assessment-Principles and framework” *ISO 14040:2006*
- [2]. International Organization for Standardization, Switzerland - 2006 - “Environmental Management-Life cycle assessment-Principles and framework” *ISO 14044:2006*
- [3]. Rasal R. M., Janorkar A. V. & Hirt D. E. - 2010 - “Poly(lactic acid) modifications” *Progress in Polymer Science* 35, 3, 338–356.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003>
- [4]. Hans-Josef Endres and Andrea Siebert-Raths - 2011 - “Engineering Biopolymers: Markets, Manufacturing, Properties and Applications” Hanser, Sample Chapter 6
- [5]. Fausto Gironi, Vincenzo Piemonte - 2011 - “Bioplastics and Petroleum-based Plastics: Strengths and Weaknesses” *Energy Sources*
<https://doi.org/10.1080/15567030903436830>
- [6]. Benítez A., Sánchez J. J., Arnal M. L., Müller A. J., Rodríguez O. and Morales G. – 2013 - “Abiotic degradation of LDPE and LLDPE formulated with a pro-oxidant additive” *Polymer Degradation and Stability* 98(2), 490–501
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2012.12.011>
- [7]. Rolf Mülhaupt - 2013 - “Green Polymer Chemistry and Bio-based Plastics: Dreams and Reality” *Macromolecular Chemistry and Physics* 214, 159-174
<https://doi.org/10.1002/macp.201200439>
- [8]. Sam Deconinck & Bruno De Wilde - 2013 - “Benefits and Challenges of Bio- and Oxo-degradable plastics (DSL 1)” *O.W.S.*
- [9]. 2013 - Conformity mark OK biobased: certification scheme, Vilvoorde: Vinçotte
- [10]. 2013 - “Production of Bio-ethylene” *ETSAP (Energy Technology System Analysis Programme) and IRENA (International Renewable Energy Agency)*
- [11]. Casasola R., Thomas N. L., Trybala A. & Georgiadou S. - 2014 - “Electrospun poly lactic acid (PLA) fibres: Effect of different solvent systems on fibre morphology and diameter” *Polymer* 55, 18, 4728–4737
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.06.032>

- [12]. Hong J., Zhang Y., Xu X., Li X. - 2014 - “Life cycle assessment of corn- and cassava-based ethylene production” *Biomass and Bioenergy* 67, 304-311
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.014>
- [13]. Prueksakorn K., Gheewala S.H., Sagisaka M., Kudoh Y. - 2014 - “Sugarcane biorefinery complex in Thailand and a proposed method to cope with apportioning its environmental burdens to co-products” *Journal of Sustainable Energy & Environment* 5, 95-103
- [14]. Corneillie S. & Smet M. - 2015 - “PLA architectures: the role of branching” *Polymer Chemistry* 6, 6, 850–867
<https://doi.org/10.1039/c4py01572j>
- [15]. E. Arikan & H. Ozsoy. - 2015 - “A Review: Investigation of Bioplastics” *Journal of Civil Engineering and Architecture* 9, 188-192
<https://doi.org/10.5281/zenodo.2600664>
- [16]. Karl E. LORBER, Gernot KREINDL, Ertugrul ERDIN & Hasan SARPTAS - 2015 - “Waste Management Options for Biobased Polymeric Composites”
<https://www.researchgate.net/publication/276065476>
- [17]. Sarc R. - 2015 - “Design, Quality and Quality Assurance of Solid Recovered Fuel (SRF) for Achieving 100 % Thermal Substitution in Cement Industry” *PhD-Work (Doctoral Thesis) at Montanuniversitaet Leoben, Austria*
- [18]. 2015 - *European Bioplastics, Publications*
- [19]. “What are bioplastics?” *European Bioplastic (2016)*
- [20]. A. Jordá-Vilaplana, A. Carbonell-Verdú, M.D. Samper, A. Pop, D. Garcia-Sanoguera - 2017 - “Development and characterization of a new natural fiber reinforced thermoplastic (NFRP) with Cortaderia selloana (Pampa grass) short fibers”
Composites Science and Technology, Volume 145
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.03.036>
- [21]. Ingrid Odegard, Sanne Nusselder, Erik Roos Lindgreen, Geert Bergsma, Lonneke de Graaff - 2017 - “Biobased Plastics in a Circular Economy” *CE Delf*
- [22]. Troy A. Hottlea, Melissa M. Bilecb, Amy E. Landisc - 2017 - “Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment” *Resources, Conservation and Recycling* 122, 295-306
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.03.002>

- [23]. Worayut Saibuatrong, Nitchanan Cheroennet, Unchalee Suwanmanee - 2017 - “Life cycle assessment focusing on the waste management of conventional and bio-based garbage bags” *Journal of Cleaner Production* 158, 319-334
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.006>
- [24]. International Energy Agency - 2018 - “The Future of Petrochemicals” *Analysis International Energy Agency*, 11–25
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>
- [25]. Sataloff R. T., Johns M. M. and Kost K. M. - 2018 - “What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050”
- [26]. Backes E., Pires L., Costa L., Passador F. & Pessan L. - 2019 - “Analysis of the Degradation During Melt Processing of PLA/Biosilicate® Composites” *Journal of Composites Science* 3, 52
<https://doi.org/10.3390/jcs3020052>
- [27]. Duque J. V. F., Martins M. F., Debenest G. and Orlando M. T. D. A. – 2020 - “The influence of the recycling stress history on LDPE waste pyrolysis” *Polymer Testing* 86, 106460
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106460>
- [28]. Folino A., Karageorgiou A., Calabrò P.S., Komilis D. - 2020 - “Biodegradation of Wasted Bioplastics in Natural and Industrial Environments: A Review” *Sustainability* 12 (15), 6030
<https://doi.org/10.3390/su12156030>
- [29]. Jang Y.C., Lee G., Kwon Y., Lim J. hong & Jeong J. hyun - 2020 - “Recycling and management practices of plastic packaging waste towards a circular economy in South Korea” *Resources, Conservation and Recycling* 158, 104798
<https://doi.org/10.1016/j>
- [30]. Valentina Siracusa and Ignazio Blanco - 2020 - “Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly (ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications” *Polymers* 12, 1641
<https://doi.org/10.3390/polym12081641>
- [31]. 2020 - *European Bioplastics, Publications*
<http://www.european-bioplastics.org/news/publications/>

- [32]. 2021 - “ASTM D6866 - Standard test methods for determining the biobased content of solid, liquid, and gaseous samples using radiocarbon analysis.” *ASTM International*
- [33]. Md Hafizur Rahman, Prakashbhai R. Bhoi - 2021 - “An overview of non-biodegradable bioplastics” *Journal of Cleaner Production* 294
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218>
- [34]. Bishop G., Styles D., Lens P.N.L. - 2022 - “Land-use change and valorisation of feedstock side-streams determine the climate mitigation potential of bioplastics” *Resources, Conservation and Recycling* 180, 106185
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106185>
- [35]. Sabino De Gisi, Giovanni Gadaleta, Giuliana Gorrasi, Francesco Paolo La Mantia, Michele Notarnicola, Andrea Sorrentino - 2022 - “The role of (bio)degradability on the management of petrochemical and bio-based plastic waste” *Journal of Environmental Management* 310
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114769>
- [36]. Antonio Jose Suarez Simancas - 2022 - “Forest Biomaterials” *A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University*
- [37]. Manuel Burelo, Josué David Hernández-Varela, Dora I. Medina, Cecilia D. Trevino-Quintanilla - 2023 - “Recent developments in bio-based polyethylene: Degradation studies, waste management and recycling” *Heliyon* 9
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21374>
- [38]. Seyed Hashem Mousavi-Avval, Kamalakante Sahoo, Prakash Nepal, Troy Runge, Richard Bergman - 2023 - “Environmental impacts and techno-economic assessments of biobased products: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 180
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113302>
- [39]. Elisabeth Van Roijen, Sabbie A. Miller - 2024 - “Towards the production of net-negative greenhouse gas emission bio-based plastics from 2nd and 3rd generation feedstocks” *Journal of cleaner production* 445
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141203>

- [40]. Xiang Yun Debbie Soo, Joseph Kinyanjui Muiruri, Wen-Ya Wu, Jayven Chee Chuan Yeo, Suxi Wang, Nikodem Tomczak, Warintorn Thitsartarn, Beng Hoon Tan, Pei Wang, Fengxia Wei, Ady Suwardi, Jianwei Xu, Xian Jun Loh, Qingyu Yan and Qiang - 2024 - “Bio-Polyethylene and Polyethylene Biocomposites: An Alternative toward a Sustainable Future” *Macromolecular Rapid Communications*
<https://doi.org/10.1002/marc.202400064>
- [41]. Zoi Terzopoulou & Dimitrios N. Bikiaris - 2024 - “Biobased plastics for the transition to a circular economy” *Materials Letters* 362
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136174>