

Report intermedio per la divulgazione dei risultati raggiunti in itinere

PROGETTO

“Riciclo e Riutilizzo delle Materie Plastiche e Produzione di Energia Verde in processi circolari”

“CIRCLE-P”

RIGUARDO ALLE ATTIVITA' DI R&S SVOLTE

DALLA DATA 19/06/2025

ALLA DATA 30/09/2026

1. Sintesi degli obiettivi generali e specifici di progetto

Il progetto CIRCLE-P persegue l'obiettivo generale di sviluppare e validare processi tecnologici ed industriali per la valorizzazione circolare dei rifiuti plastici e la contestuale produzione di energia verde ed intermedi chimici. La struttura strategica del progetto si articola su tre Work Package (WP) trasversali:

- **WP1: Riciclo chimico e meccanico di poliesteri e poliuretani.** Il WP si focalizza sul recupero di scarti industriali pre-consumer (tessuti poliestere ed espansi poliuretanici rigidi), sull'ottimizzazione dei processi di solvolisi e glicolisi per l'ottenimento di polioli rigenerati, e sulla realizzazione di nuovi manufatti industriali, quali formulazioni per schiume isolanti e pannelli multistrato elastomerici.
- **WP2: Recupero di rifiuti plastici sanitari.** Il WP affronta la caratterizzazione dei flussi di scarto generati dai laboratori della struttura sanitaria, integra principi di Green Procurement a monte e mappa i consumi materici per l'applicazione di tecnologie BAT (Best Available Techniques) di sterilizzazione, finalizzate al successivo riciclo meccanico o alla valorizzazione termochimica.
- **WP3: Produzione di H₂, CO₂ ed intermedi chimici da processi di gassificazione delle plastiche eterogenee.** Il WP persegue la produzione di idrogeno, CO₂ e azoto mediante pirogassificazione di plastiche eterogenee (PEFV), integrata da modellazione termodinamica, impiego di membrane di purificazione, sistemi catalitici e sviluppo di un modulo prototipale integrato sull'impianto pilota.

2. Tabella sintetica di tutti i partecipanti al progetto CIRCLE-P,

La seguente tabella è comprensiva del ruolo coperto nel partenariato e delle specifiche funzioni operative e scientifiche assegnate:

Partecipante / Ente	Ruolo nel Progetto	Funzioni e Responsabilità Operative
Green Tech Italy	Capofila / Soggetto Giuridico	Rappresentante legale della Rete Innovativa Regionale Veneto Green Cluster; responsabile della gestione amministrativa, del coordinamento generale e dei rapporti con l'ente erogatore.
Akkotex S.r.l.	Partner Industriale (Produttore / Tessile)	Selezione, separazione e caratterizzazione degli scarti tessili in poliestere (PET puro e misto); verificate le applicazioni industriali dei materiali riciclati; Task Leader del Task 9 per l'analisi della <i>closed-loop supply chain</i> B2B.
Fastcold S.r.l.	Partner Industriale (Trasformatore / Refrigerazione)	Selezione e preparazione di scarti in poliuretano espanso rigido (PUR/PIR); codifica delle procedure di schiumatura, maturazione e taglio; sperimentazione del riciclo meccanico e produzione di nuovi pannelli isolanti (Task Leader Task 4 e 5).
Technochem S.r.l.	Partner Industriale (Sistemi Poliuretanici)	Sviluppo e formulazione di nuovi sistemi e prepolimeri poliuretanici con polioli da riciclo; esecuzione di test di schiumatura in laboratorio e su scala industriale ad alta pressione (Task Leader Task 3).

Alioth S.r.l.	Partner Industriale (Produzione Compositi)	Progettazione di pannelli multistrato (acciaio-elastomero con gomma da PFU e resina riciclata); sviluppo dell'impianto pilota robotizzato e integrazione del sistema di riscaldamento ad induzione magnetica (Task Leader Task 6 e 7).
PFG-Hybrid S.r.l.	Partner Industriale (Pirogassificazione)	Gestione dell'impianto pilota di pirogassificazione di Grisignano di Zocco; sperimentazione dell'upgrade impiantistico per il trattamento di plastiche eterogenee (PEFV) e purificazione di idrogeno, CO ₂ e azoto (Task Leader Task 8 e 14).
Euro CSV S.r.l.	Partner Industriale (Servizi Ambientali)	Supporto tecnico, impiantistico e logistico nei tre WP; ausilio all'inquadramento normativo, caratterizzazione ed attribuzione dei codici CER/EER dei rifiuti e supporto all'integrazione del prototipo.
Chimicambiente S.r.l.	Partner Industriale (Laboratorio Analitico)	Esecuzione di analisi chimico-fisiche e ambientali; caratterizzazione analitica dei polimeri, verifica dei codici EER e della pericolosità dei rifiuti; monitoraggio delle emissioni gas dal pirogassificatore.
UNIPD – Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII)	Organismo di Ricerca	Ricerca scientifica sulla solvolisi/glicolisi chimica di PET e PUR; caratterizzazione avanzata (FT-IR, DSC, SEM); modellazione fluidodinamica e simulazione Aspen Plus del reattore di pirogassificazione (Task Leader Task 1, 2, 10, 12).
UNIPD – Dipartimento di Medicina (DIMED)	Organismo di Ricerca / Produttore Sanitari	Mappatura, quantificazione e analisi dei flussi di scarti plastici dai laboratori clinici; selezione delle plastiche sanitarie idonee alla sterilizzazione e valutazione dell'impatto termico sui polimeri (Task Leader Task 11).
UNIVE – Dip. Scienze Molecolari e Nanosistemi (DSMN)	Organismo di Ricerca	Selezione e caratterizzazione di membrane selettive per la purificazione del syngas e di catalizzatori (WGS/hydrocracking) per incrementare la resa in idrogeno; coordinamento della disseminazione (Task Leader Task 13 e 15).
UNIVR – Dipartimento di Management (DIMA)	Organismo di Ricerca	Studio economico della <i>closed-loop supply chain</i> B2B; esperimenti di mercato sul comportamento dei consumatori; definizione di linee guida di <i>Green Procurement</i> sanitario e marchi di certificazione/tracciabilità (Task Leader Task 9).

3. Avanzamento dettagliato e risultati per work package

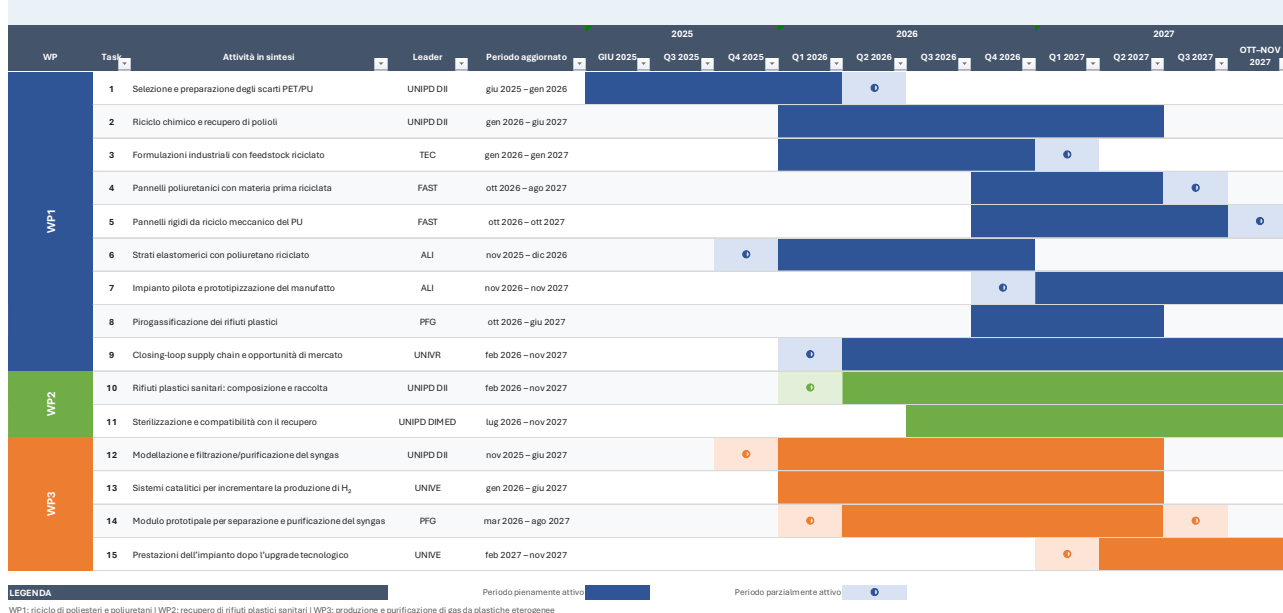
Di seguito è riportata la tabella riepilogativa di tutti i **Task** articolati nei tre **Work Package (WP)** del progetto **CIRCLE-P**, con l'indicazione della descrizione sintetica.

WP	TASK N°	DENOMINAZIONE E DESCRIZIONE SINTETICA
WP1	Task 1	Preparazione e selezione di rifiuti in poliestere e poliuretano: Cernita, separazione e caratterizzazione analitica degli scarti tessili (PET) e dei rifili di poliuretano rigido.
WP1	Task 2	Test di riciclo chimico su piccola scala: Prove di solvolisi e glicolisi su scala di laboratorio per l'ottenimento di polioli riciclati da scarti polimerici.
WP1	Task 3	Sviluppo di formulazioni con feedstock riciclato per utilizzo industriale: Formulazione di mescole PUR/PIR e test di schiumatura ad alta pressione fino al 20% di sostituzione.
WP1	Task 4	Realizzazione di nuovi prodotti poliuretanici con un contenuto di feedstock riciclato: Produzione e campionatura di schiume rigide per pannelli isolanti.
WP1	Task 5	Produzione di pannelli rigidi tramite riciclo meccanico di poliuretano: Sperimentazione del riciclo meccanico di sfridi frantumati legati da prepolimeri.
WP1	Task 6	Valorizzazione del poliuretano riciclato per strati elastomerici: Progettazione del pannello multistrato acciaio-elastomero (80% PFU / 20% resina) e integrazione del riscaldamento ad induzione.
WP1	Task 7	Realizzazione dell'impianto pilota e prototipizzazione del manufatto accoppiato: Ingegnerizzazione ed esecuzione della linea pilota robotizzata per pannelli accoppiati.
WP1	Task 8	Pirogassificazione per una gestione integrata dei rifiuti plastici: Mappatura tecnico-funzionale e prove sull'impianto pilota di Grisignano di Zocco per matrici non riciclabili.
WP1	Task 9	Closing loop supply chain e analisi delle opportunità di mercato: Studio dei modelli B2B per scarti industriali <i>pre-consumer</i> e trasparenza di filiera.
WP2	Task 10	Composizione dei rifiuti plastici sanitari e sviluppo di strategie di raccolta: Mappatura dei flussi nei laboratori clinici, selezione dei polimeri e linee guida di Green Procurement.
WP2	Task 11	Selezione di tecnologie BAT per la sterilizzazione e integrazione nei modelli gestionali: Prove su autoclave/microonde e valutazione della degradazione polimerica dei dispositivi sanitari.
WP3	Task 12	Individuazione di membrane, modellazione e simulazione del processo: Modellazione numerica in Aspen Plus del reattore di pirogassificazione per il dimensionamento del prototipo.
WP3	Task 13	Individuazione di sistemi termici e/o catalitici per ottimizzare la produzione di H₂: Selezione di catalizzatori WGS/hydrocracking e membrane selettive (Pd-Ag/polimeriche) per la purificazione dell'idrogeno.
WP3	Task 14	Realizzazione di un modulo impiantistico prototipale di filtrazione: Adeguamenti meccanici ed estrazione gas sull'impianto pilota per la separazione dell'idrogeno dal syngas.
WP3	Task 15	Analisi delle prestazioni dell'impianto a seguito dell'upgrade tecnologico: Valutazione dell'impatto ambientale ed economico (LCA) e replicabilità del processo.

Di seguito è riportato il cronoprogramma di progetto:

CIRCLE-P | Cronoprogramma divulgativo aggiornato

Riciclo e Riutilizzo delle Materie Plastiche e Produzione di Energia Verde in processi circolari



3.1 WP1: Riciclo Chimico e Meccanico di Poliesteri e Poliuretani

Infografica degli obiettivi e risultati intermedi conseguiti



Di seguito sono riportati i risultati intermedi conseguiti in ogni task di progetto:

- **Task 1 (Preparazione e selezione rifiuti):** il team di ricerca ha definito le procedure per la cernita e rimozione delle componenti incompatibili. I tessuti forniti da Akkotech sono stati suddivisi in 3 macro-famiglie (100% PET, PET/PU elastomerico e PET/PU flessibile), mentre per Fastcold sono stati selezionati scarti di poliuretano rigido (PUR e PIR). I campioni sono stati caratterizzati analiticamente da UNIPD DII (FT-IR, DSC, SEM) e da Chimicambiente, confermando l'attribuzione dei codici EER non pericolosi (04.02.22 per gli scarti tessili e 07.02.13 per i poliuretani). Le matrici preparate sono state inviate a UNIPD DII per i successivi test di solvolisi.
- **Task 2 (Riciclo chimico su piccola scala):** è stata ottimizzata la reazione di solvolisi/glicolisi per scarti poliuretanici al fine di estrarre polioli riutilizzabili in formulazioni PIR/PUR. Dopo l'analisi preliminare delle matrici, sono state testate diverse miscele di glicoli, catalizzatori, profili termici e tempi di reazione. I prodotti ottenuti sono stati analizzati in termini di viscosità e peso molecolare. Il partner Chimicambiente ha eseguito uno specifico protocollo di caratterizzazione avanzata che ha previsto uno screening LC-MS per il tracciamento delle ammine aromatiche, una determinazione multielementare ICP-OES per identificare i residui metallici dei catalizzatori e la ricerca analitica degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA/PAH). È stato integrato uno step chimico di deaminazione per azzerare la tossicità. Formulati fino al 50% in sostituzione del poliolo vergine, i polioli rigenerati hanno mostrato proprietà fisico-meccaniche e termiche del tutto comparabili alle schiume standard.
- **Task 3 (Formulazioni industriali):** Technochem ha sviluppato formulazioni per poliuretani espansi rigidi (PIR/PUR) utilizzando i polioli rigenerati forniti da UNIPD DII. Sono stati eseguiti test di

schiumatura in laboratorio e prove di scala industriale ad alta pressione mediante testa di miscelazione Cannon su mescole da 100 kg. I dati dimostrano che una soglia massima di sostituzione del 20% di poliolo vergine garantisce il pieno mantenimento della reattività del sistema e della stabilità dimensionale della schiuma, mentre dosaggi al 50% causano ritiri strutturali che richiedono correzioni formulative.

- **Task 4 (Nuovi prodotti poliuretatici):** Fastcold ha anticipato le attività preparatorie per la fabbricazione di pannelli sandwich isolanti. È stata allestita una campionatura di schiume rigide (sistemi espandenti ad acqua/HFO e additivi antifiamma, integrando sia formulazioni di nuova produzione sia matrici estratte da pannelli invecchiati). È stata codificata la procedura operativa standard (pulizia schiumatrice, iniezione, pressatura, maturazione e sezionamento meccanico), consegnando i campioni a UNIPD DII per le successive analisi.
- **Task 5 & Task 7:** Il Task 5 non è stato ancora avviato, mentre il Task 7 risulta in fase di avvio regolare come da cronoprogramma.
- **Task 6 (Pannello multistrato elastomerico):** Alioth ha definito la struttura del pannello multistrato acciaio-elastomero con anima composta per il 20% da resina PU (contenente poliolo riciclato) e per l'80% da polverino di pneumatici fuori uso (PFU). Prove su 20 formulazioni hanno evidenziato un'ottima adesione ma tempi di polimerizzazione a freddo eccessivi per i cicli industriali. Per superare questa criticità, è stata attivata la consulenza specialistica di EMAC Srl per ingegnerizzare un sistema di riscaldamento ad induzione elettromagnetica integrato nella piastra di compattazione, ridisegnando l'impianto pilota come cella robotizzata discontinua.
- **Task 8 (Pirogassificazione e gestione integrata):** è stata condotta un'analisi tecnico-funzionale sull'impianto pilota di Grisignano di Zocco, mappando il processo e riesaminando i dati delle campagne sperimentali 2023 su matrici coperte da codici EER, al fine di stabilire le condizioni operative e diagnostiche per le successive prove integrate.
- **Task 9 (Closed-loop supply chain e mercato):** UNIVR ha coordinato l'analisi della letteratura scientifica su trasparenza, visibilità e tracciabilità nelle filiere closed-loop. In collaborazione con Akkotex, lo studio ha riorientato il focus rispetto alla visione B2C tradizionale, integrando l'analisi dei flussi B2B legati alla gestione degli scarti industriali pre-consumer (rappresentanti dal 40% al 60% del materiale lavorato da Akkotex), essenziali per l'applicazione industriale (Deliverable D9.1 in versione preliminare).

3.2 WP2: Recupero di Rifiuti Plastici Sanitari

Infografica degli obiettivi e risultati intermedi conseguiti

Circolarità dei Rifiuti Plastici Sanitari: Risultati e Strategie del WP2

Il Work Package 2 (WP2) si focalizza sulla transizione verso un'economia circolare per i rifiuti plastici sanitari. L'attività integra l'analisi tecnica dei materiali con una visione olistica del ciclo di vita, dal procurement alla sterilizzazione, per massimizzare il recupero di materia.

Visione Strategica e Obiettivi Integrati



Gestione del Ciclo di Vita

Passaggio dal semplice trattamento del rifiuto a un'analisi olistica dell'intero ciclo produttivo.

Green Procurement e Logistica

Identificazione di criteri d'acquisto sostenibili per facilitare la successiva raccolta differenziata.



Gerarchia dei Rifiuti

Priorità al riutilizzo dei componenti previa sterilizzazione rispetto al riciclo meccanico.

Analisi dei Materiali e Validazione Tecnica

57% di Manufatti Multicomponente

57%

L'analisi ha rivelato un'alta complessità strutturale che richiede strategie di separazione mirate.



Prevalenza di Poliolefine



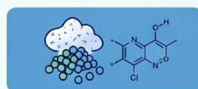
La caratterizzazione materia ha confermato la netta dominanza di polipropilene (PP) e polietilene (PE).

Tecnologie di Sterilizzazione



Valutazione di metodi tradizionali e innovativi per garantire la compatibilità con il riciclo.

Sintesi della Caratterizzazione e Normativa



Inquadramento Normativo:
 Codifica EER e mappatura
 contaminazione completata

Di seguito sono riportati i risultati intermedi conseguiti in ogni task di progetto:

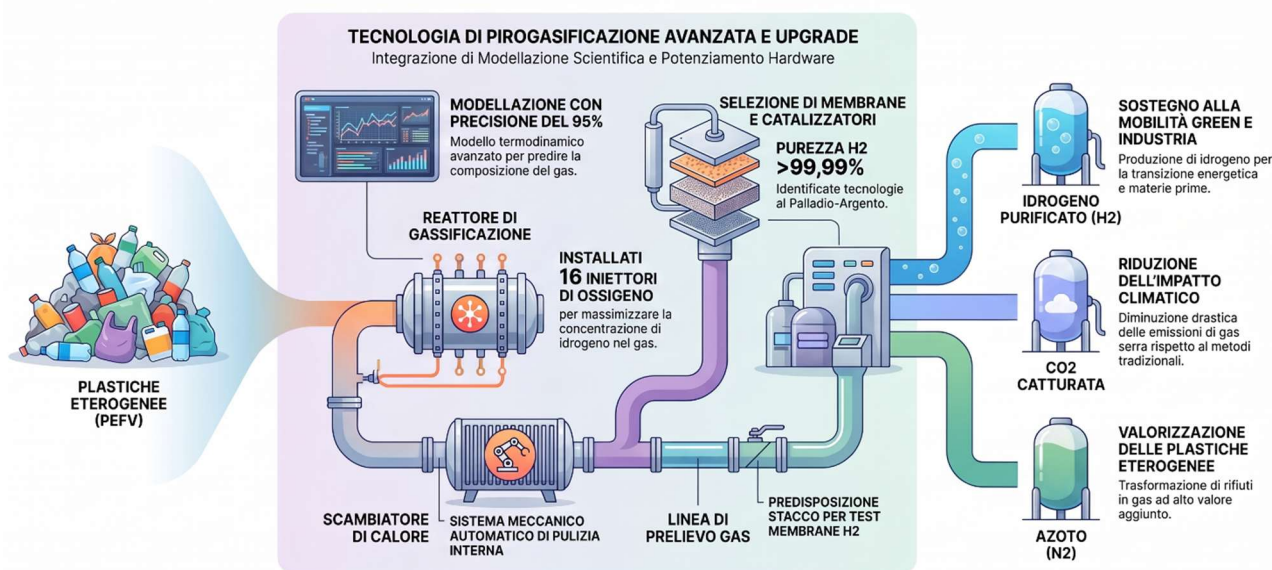
- **Task 10 (Composizione rifiuti sanitari e strategie di raccolta):** il task ha ampliato la propria metodologia integrando lo studio del ciclo di vita dei materiali di laboratorio e l'analisi del Green Procurement a monte (con UNIVR). L'Università di Padova - Dipartimento di Medicina / DIMED), ha completato la mappatura dei consumi, dei flussi di scarto e dei livelli di contaminazione (biologica, chimica, assente) presso 10 laboratori della struttura. UNIPD DII ha eseguito lo smontaggio, la conversione massica (kg/anno) e la caratterizzazione polimerica (FT-IR, DSC), individuando una netta prevalenza di poliolefine (PP e PE) e una quota del 57% di manufatti multicomponente. Euro CSV e Chimicambiente hanno definito l'inquadramento normativo e l'attribuzione dei codici EER (18 01 03* per la frazione pericolosa a rischio infettivo e 18 01 04 per quella non pericolosa).
- **Task 11 (Tecnologie BAT di sterilizzazione):** è stato completato lo scouting bibliografico sulle migliori tecnologie disponibili (BAT) per la sterilizzazione di scarti plastici sanitari. Sono stati analizzati processi tradizionali (autoclavaggio, microonde, disinfezione chimica) e sistemi innovativi, valutandone efficacia microbiologica, compatibilità con la struttura polimerica, costi di gestione e potenziale di avvio al riciclo meccanico o alla valorizzazione termochimica.

3.3 WP3: Produzione di H₂, CO₂ ed Intermedi Chimici da Gassificazione

Infografica degli obiettivi e risultati intermedi conseguiti

Innovazione Circolare: Idrogeno e Gas Industriali da Rifiuti Plastici

Trasformazione delle plastiche eterogenee a fine vita in risorse ad alto valore per la transizione energetica e l'industria.



Di seguito sono riportati i risultati intermedi conseguiti in ogni task di progetto:

- **Task 12 (Modellazione e membrane):** UNIPD ha sviluppato in Aspen Plus un modello termodinamico basato sull'equazione di stato Peng-Robinson BM per la simulazione della pirogassificazione. I rifiuti plastici eterogenei sono stati modellati come componenti non convenzionali, validandone le proprietà fisiche e termiche con un errore relativo inferiore al 5%. Unitamente a PFG Hybrid, Euro CSV e Chimicambiente, sono stati eseguiti sopralluoghi tecnici per i rilievi geometrici, la mappatura dei sensori in linea e il dimensionamento prototipale.
- **Task 13 (Sistemi termici/catalitici per H₂):** UNIVE ha completato l'analisi brevettuale e di mercato selezionando catalizzatori commerciali (Ni, Co, metalli nobili) e sistemi a membrana (polimeriche per il pre-aricchimento, Pd-Ag/PSA per la purificazione finale). In collaborazione con le consulenze specialistiche di K-INN Tech S.r.l. ed Euro CSV Srl, sono stati condotti calcoli termodinamici sulla reazione di Water-Gas Shift (WGS). Le simulazioni provano che la conversione del monossido di carbonio consente di raddoppiare la resa iniziale di idrogeno. È stato dimostrato che un rapporto di eccesso di vapore pari a 3:1 ($H_2O/CO = 3$) garantisce conversioni quasi totali, evidenziando la necessità di adottare un catalizzatore ad elevata selettività per inibire reazioni secondarie indesiderate.
- **Task 14 (Upgrade prototipale del gassificatore):** PFG Hybrid ed Euro CSV hanno eseguito gli interventi di adeguamento fisico sull'impianto pilota di pirogassificazione per risolvere le criticità operative storiche (eccesso d'aria, combustione incontrollata e accumulo di char). Gli interventi hanno compreso: sostituzione dell'albero motore, smontaggio del fondo reattore, installazione di 16 bocchelli per l'iniezione dosata di O₂ (finalizzata a ridurre la frazione di azoto nel syngas e incrementare la quota di H₂), montaggio di un sistema automatico di pulizia dello scambiatore di calore e

predisposizione di uno stacco da ¼" su condotta DN 114 per l'integrazione del modulo a membrana. È stata inoltre avviata l'ingegnerizzazione dei sistemi ausiliari, compresi l'integrazione del compressore e i sistemi di lavaggio e scrubbing del gas.

- **Task 15:** In attesa di avvio come da cronoprogramma.

6. Conoscenza generata, trasferibilità e prospettive di sviluppo industriale

Le attività condotte nella prima fase del progetto CIRCLE-P hanno generato un significativo avanzamento scientifico-tecnologico nel campo della caratterizzazione polimerica e della conversione termochimica. Sotto il profilo della scienza dei materiali, le evidenze analitiche e sperimentali hanno stabilito una soglia critica del 20% di sostituzione del poliolo vergine con feedstock da solvolisi per prevenire fenomeni di ritiro strutturale nelle schiume rigide isolanti, preservando le prestazioni meccaniche dei formulati. Contestualmente, lo sviluppo di una miscela formata per il 20% da resina poliuretanicica rigenerata e per l'80% da polverino di pneumatici fuori uso (PFU), accoppiata alla tecnologia di reticolazione mediante riscaldamento ad induzione elettromagnetica in cella robotizzata discontinua, dimostra la fattibilità tecnica di trasformare scarti elastomerici complessi in manufatti ad alto valore aggiunto.

In termini di gestione dei flussi e logistica industriale, la mappatura condotta sui rifiuti sanitari da laboratorio ha rilevato una frazione multicomponente del 57% e una netta dominanza di poliolefine (PP e PE), fornendo la base oggettiva per la riprogettazione delle strategie di raccolta e sterilizzazione a livello territoriale. Sul versante delle filiere manifatturiere tessili e sintetiche, l'integrazione di modelli B2B specificamente strutturati sugli scarti pre-consumer (che rappresentano dal 40% al 60% dei volumi di lavorazione industriali come nel caso Akkotex) supera i limiti dei tradizionali schemi B2C, offrendo una tracciabilità trasparente ed economicamente sostenibile lungo la catena del valore.

Nell'ambito dell'ingegneria di processo e della gassificazione termochimica, la validazione del modello in Aspen Plus basato sull'equazione di stato Peng-Robinson BM (con un errore relativo verificato inferiore al 5%) costituisce uno strumento predittivo ad alta accuratezza per l'ottimizzazione del syngas. Tale strumento, integrato dall'installazione di 16 bocchelli per l'iniezione di O_2 e dall'applicazione della reazione di Water-Gas Shift con rapporto vapore/monossido $H_2O/CO = 3$, offre una soluzione impiantistica concreta per raddoppiare la resa in idrogeno e abbattere la concentrazione di azoto. L'insieme di questi risultati garantisce un'elevata trasferibilità tecnologica al distretto industriale di riferimento e alla Rete Innovativa Regionale (RIR), delineando un modello trasversale di decarbonizzazione e valorizzazione circolare dei rifiuti plastici.