

Ricerca di Sistema elettrico



Sviluppo di modelli matematici per la valutazione dei consumi energetici nel processo di pressure molding (LA3.9)

Andrea Luigi Facci; Marco Maggini

Sviluppo di modelli matematici per la valutazione dei consumi energetici nel processo di pressure molding

LA 3.9 Sviluppo e applicazione di una metodologia di calcolo dei consumi energetici di riferimento per unità di prodotto.

A.L.Facci, M. Maggini Università degli Studi della Toscana

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.6 - Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Linea di attività: LA 3.9

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work Package: Fabrizio Martini, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte UNIONPLAST

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Riscaldamento e Fusione del Polimero.....	10
7.2	Lavoro di Riempimento dello Stampo.....	11
7.3	Raffreddamento dei pezzi stampati	11
7.4	Formulazione degli indici di prestazione.....	11
7.5	Definizione della catena di misure e la valutazione degli indici di consumo.....	12
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	14
9	Pubblicazioni scientifiche.....	15
10	Eventi di disseminazione	16

Indice delle figure

Figura 1 – Schema del processo di molding. 10

1 Risultati attesi

Il principale risultato atteso è lo sviluppo e applicazione di una metodologia di calcolo dei consumi energetici di riferimento per unità di prodotto di un processo energivoro.

L'attività ha come obiettivo la determinazione analitica dei consumi energetici e la definizione di indicatori di prestazione energetica di riferimento specifici utili per stabilire le performance energetiche di un processo industriale energivoro. Tali indicatori di prestazione energetica renderanno possibile identificare le best practices, i possibili interventi di efficientamento ed in generale quantificare i margini per l'innalzamento dell'efficienza energetica di un processo.

I risultati attesi di questa linea di attività si concretizzano nei seguenti risultati:

- Definizione dei modelli fisico matematici per il calcolo degli indicatori energetici di riferimento per un settore energivoro con l'illustrazione sia delle funzionalità, che delle variabili di input-output, e delle procedure di applicazione.
- Procedure di misura utili al fine di confrontare i consumi reali con gli indici di riferimento.

2 Risultati ottenuti

L'attività svolta nel settore della plastica ha permesso di:

- Identificare il processo maggiormente rilevante in termini di consumi energetici, ovvero il processo di "pressure molding" di modelli plastici.
- Identificare i principali vettori energetici utilizzati durante il processo, ovvero l'energia elettrica necessaria sia al riscaldamento e fusione dei polimeri sia alla movimentazione dei polimeri fusi ed al riempimento degli stampi.
- Elaborare un modello matematico per la stima del consumo limite ideale per unità di prodotto basato sulla termodinamica del processo in esame.
- Definire la catena di misura atta alla valutazione del consumo effettivo e quindi alla valutazione dell'efficienza del processo e dei margini di efficientamento.

3 Prodotti attesi

NON SONO PREVISTI PRODOTTI OLTRE AL PRESENTE REPORT

4 Prodotti sviluppati

NON SONO PREVISTI PRODOTTI OLTRE AL PRESENTE REPORT

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si registrano significativi scostamenti relativamente alle attività previste né in relazione ai risultati attesi, né in relazione ai costi sostenuti per il loro svolgimento.

6 Sintesi delle attività svolte

Le principali attività svolte nell'ambito dell'accordo di collaborazione "Sviluppo e applicazione di una metodologia di calcolo dei consumi energetici di riferimento per unità di prodotto" possono essere sinteticamente descritte come:

- Identificazione del settore su cui concentrare l'analisi modellistica. L'attività è stata svolta in collaborazione con l'Università degli Studi di Salerno e con ENEA ed ha permesso di identificare il settore della plastica.
- Identificazione, dei processi maggiormente energivori. L'attività è stata svolta in collaborazione con l'Università degli Studi di Salerno e con ENEA. Il processo di "pressure molding" è risultato il processo maggiormente energivoro.
- Elaborazione del modello fisico-matematico per il calcolo del consumo ideale di riferimento per il processo.
- Identificazione della catena di misure necessaria alla valutazione del consumo reale e, di conseguenza dell'efficienza del processo e delle opportunità di miglioramento.

7 Dettaglio delle attività svolte

Sulla base dell'attività di ricerca bibliografica svolta nella prima fase del progetto, è stato possibile definire un modello matematico a parametri concentrati che permetta di calcolare il limite termodinamico ideale per il consumo energetico del processo di pressure molding. È stato inoltre definito un consumo di riferimento operativo, che tenga conto della presenza di alcuni inevitabili consumi presenti nel processo reale.

Di seguito sono riportati i dettagli fisico-matematici del modello elaborato.

Nel processo di Injection molding, schematicamente rappresentato in Figura 1, i principali contributi al consumo ideale di energia (E_{id}) derivano dal riscaldamento e liquefazione del polimero (E_{melt}), dal lavoro necessario al riempimento dello stampo (E_{fill}), dall'energia necessaria al raffreddamento attivo del componente finito (E_{cool}) (eq (1)).

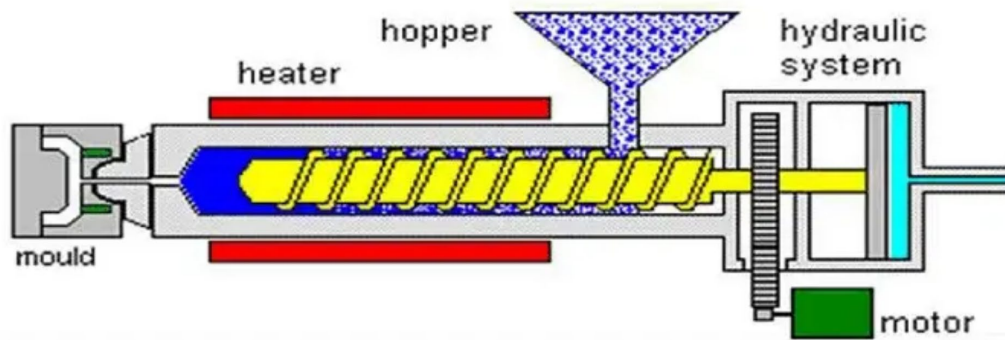


Figura 1 - Schema del processo di molding.

$$E_{id} = E_{melt} + E_{fill} + E_{cool} \quad (1)$$

Poiché si tratta di un processo di tipo batch è possibile definire un consumo ideale operativo ($E_{id,op}$, eq. (2)) che considera anche l'energia necessaria al reset del sistema (E_{reset}) tra un batch ed il successivo. I contributi principali a tale consumo sono il riscaldamento della macchina e l'apertura e chiusura degli stampi.

$$E_{id,op} = E_{melt} + E_{fill} + E_{cool} + E_{reset} \quad (2)$$

Nelle sezioni seguenti saranno definiti matematicamente e fisicamente tutti i termini del modello elaborato.

7.1 Riscaldamento e Fusione del Polimero

Per ogni iniezione il calore da riscaldamento e fusione è dato da:

$$E_{\text{melt}} = \rho V_{\text{shot}} [c_{p,s}(T_{\text{melt}} - T_{\text{env}}) + c_{p,l}(T_{\text{inj}} - T_{\text{melt}}) + H_{\text{melt}}] \quad (3)$$

essendo ρ la densità del polimero iniettato, V_{shot} il volume totale del polimero iniettato, $c_{p,s}$ e $c_{p,l}$ i calori specifici del polimero solido e liquido rispettivamente, T_{melt} la temperatura di fusione, T_{env} la temperatura ambiente, T_{inj} la temperatura di iniezione e H_{melt} il calore latente di fusione del polimero.

Il volume iniettato viene calcolato a partire dal volume totale dei pezzi prodotti V_{part} in una singola iniezione considerando il ritiro percentuale del polimero durante il raffreddamento (ε) ed il volume necessario al gating (Δ), come riportato in eq. (4).

$$V_{\text{shot}} = V_{\text{part}}(\varepsilon + \Delta) \quad (4)$$

7.2 Lavoro di Riempimento dello Stampo

L'energia spesa per il riempimento dello stampo corrisponde al lavoro di pulsione come riportato in eq. (5),

$$E_{\text{inj}} = p_{\text{inj}} V_{\text{shot}}, \quad (5)$$

essendo p_{inj} la pressione di iniezione.

7.3 Raffreddamento dei pezzi stampati

L'energia necessaria al raffreddamento attivo dei componenti stampati prima dell'apertura dello stampo (nel caso in cui sia necessario) è pari a

$$E_{\text{cool}} = \frac{\rho V_{\text{shot}} c_{p,s} (T_{\text{inj}} - T_{\text{eje}})}{\text{COP}}. \quad (6)$$

In sede ideale, il coefficiente di prestazione (COP) del ciclo inverso che fornisce l'energia di raffreddamento è calcolabile attraverso il fattore di Carnot

$$\text{COP} = \frac{T_{\text{eje}}}{T_{\text{eje}} - T_{\text{inj}}}, \quad (7)$$

dove T_{eje} è la temperatura a cui vengono estratti i pezzi dallo stampo dopo la fase di raffreddamento.

7.4 Formulazione degli indici di prestazione

L'indice di prestazione energetica può essere definito come:

$$\eta = \frac{E_{id}}{E_{real}} \quad (8)$$

essendo E_{real} l'energia effettivamente spesa e misurata. Nel caso in cui si sia in grado di misurare l'energia spesa per le singole fasi del processo E_{real} può essere stimata come:

$$E_{real} = \frac{E_{melt}}{\eta_{melt}} + \frac{E_{fill}}{\eta_{fill}} + \frac{E_{cool}}{\eta_{cool}} + E_{reset} . \quad (9)$$

L'eq.(9) definisce implicitamente l'efficienza delle singole fasi e permette di quantificare il peso della fase di reset sul consumo totale.

7.5 Definizione della catena di misure e la valutazione degli indici di consumo

Le equazioni (8) e (9) permettono di stimare l'efficienza complessiva del processo di iniezione dei polimeri plastici una volta noti i parametri principali di processo e la misura del consumo energetico effettivo.

I parametri di ingresso del modello, necessari al calcolo del consumo di riferimento sono:

- *Caratteristiche del polimero plastico:* Densità, calore specifico del polimero liquido e solido, calore latente di liquefazione, indice di ritiro del polimero durante il raffreddamento.
- *Caratteristiche geometriche del prodotto e dello stampo:* Volume del pezzo finito e volume necessario al "gating", ovvero il volume aggiuntivo che rimane intrappolato nei condotti di alimentazione dello stampo.
- *Parametri operativi del processo:* Temperatura di iniezione del polimero, pressione di iniezione, temperatura di estrazione del pezzo dallo stampo e temperatura ambiente.

L'unico vettore energetico presente e che veicola tutta l'energia necessaria al processo di iniezione è l'energia elettrica. Pertanto, per il calcolo dell'indice di prestazione globale attraverso l'eq.(8) è sufficiente misurare la tensione e la corrente in ingresso alla macchina. Naturalmente se l'impianto presenta più punti di connessione alla rete elettrica (e.g. connessione separata per la generazione dell'energia frigorifera) è necessario sommarne tutti i contributi.

Per la stima dell'efficienza delle singole fasi del processo e la conseguente valutazione delle opportunità di efficientamento è necessario invece avere una misura puntuale di tensione e corrente forniti ai diversi componenti. In particolare:

- Motore elettrico per la movimentazione della vite senza fine che provvede al caricamento dei pellet di polimero ed alla movimentazione del polimero liquefatto.
- Driver della pompa che mantiene in pressione il sistema idraulico che garantisce la pressione del sistema di iniezione.
- Resistenza elettrica che fornisce il calore per la fusione ed il riscaldamento del polimero.

- Gruppo frigorifero che fornisce il fluido termovettore per il raffreddamento controllato dello stampo
- Sistema di movimentazione (apertura e chiusura) dello stampo.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

NON SONO STATE PREVISTE CONSULENZE

9 Pubblicazioni scientifiche

È in corso di pubblicazione una review sulle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche nel settore della plastica.

10 Eventi di disseminazione

Evento di finale attività ricerca di sistema tenutosi il 27 novembre 2024 presso il centro congressi Frentani in Roma.