

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**  
**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CHIMICA**  
**E DEI PROCESSI INDUSTRIALI**

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN**  
**INGEGNERIA CHIMICA E DEI PROCESSI INDUSTRIALI**

**STUDIO SPERIMENTALE DEL PROCESSO DI**  
**ESSICCAMENTO MEDIANTE REFRACTANCE**  
**WINDOW**

*Relatore: Prof. Paolo Canu*

*Correlatore: Prof. João Borges Laurindo*

*Laureando: PIERO CORRADINI*

Anno Accademico 2013-2014



---

## Sommario

La produzione di alimenti in polvere è una valida soluzione allo sfruttamento del surplus produttivo di frutta e vegetali in genere, che vengono così trasformati in prodotti con maggior valore aggiunto, in forma di ingredienti per uso domestico o di materia prima per la fabbricazione di altri prodotti industriali. Nello studio, in particolare, si disidrata del mango: un prodotto che in Brasile ha una produzione eccedente rispetto al consumo e la cui esportazione è ostacolata dalla facile deperibilità.

*Refractance Window*<sup>®</sup>(RW) è un processo di essiccamento sviluppato negli anni '80 del secolo scorso con l'obiettivo di produrre frutta e vegetali in polvere di qualità superiore e competere con le tecnologie attualmente dominanti come liofilizzazione, atomizzazione e essiccazione in tamburo. Nel processo di essiccamento RW, un succo o una polpa sono spalmati sulla superficie superiore di un film di PET, che è in contatto, tramite la superficie inferiore, con acqua calda. Il film di PET utilizzato è commercialmente conosciuto come *Mylar*<sup>®</sup>(DuPont) e presenta una buona trasparenza alla radiazione infrarossa emessa dall'acqua calda. In questo modo nel processo sono coinvolti i tre modi di trasferimento del calore: conduzione, convezione e irraggiamento.

In letteratura grande parte degli studi su RW è concentrata alla comparazione della qualità dei prodotti secchi ottenuti rispetto a quella dei prodotti ottenuti con metodi tradizionali. C'è quindi carenza di informazioni sul meccanismo di trasferimento di calore attraverso le interfacce acqua-film, film-polpa e polpa-ambiente.

Al fine di analizzare più dettagliatamente la tecnica *Refractance Window*<sup>®</sup>, nel seguente lavoro si cerca di discriminare la conduzione dall'irraggiamento. Con questo si vuole contribuire alla conoscenza del meccanismo di trasferimento di calore nel processo RW.

---



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Essiccamento e trasmissione del calore</b>	<b>5</b>
2.1	L'essiccamento . . . . .	5
2.1.1	Drum Drying . . . . .	7
2.1.2	Spray Drying . . . . .	8
2.1.3	Freeze Drying . . . . .	9
2.1.4	Refractance Window . . . . .	11
2.2	Trasmissione del calore . . . . .	15
2.2.1	Conduzione . . . . .	15
2.2.2	Convezione . . . . .	16
2.2.3	Irraggiamento . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Materiali e metodi</b>	<b>23</b>
3.1	Impianto Refractance window . . . . .	23
3.2	Il film in Mylar . . . . .	24
3.3	Termocamera FLIR T360 . . . . .	27
3.4	Essiccamento del mango . . . . .	28
3.5	Contenuto di acqua . . . . .	30
3.6	Piastra metallica . . . . .	31
3.7	Il calorimetro . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Risultati e discussione</b>	<b>37</b>
4.1	Confronto tra RW e piastra metallica . . . . .	37
4.2	Confronto tra RW e RW schermato . . . . .	43

---

---

4.3	Termografie . . . . .	46
4.4	Valutazioni teoriche del calore trasmesso . . . . .	48
4.5	Discussione sul Refractance Window . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Nomenclatura e valori</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Termografie</b>	<b>60</b>
<b>C</b>	<b>Brochure commerciale del Refractance Window</b>	<b>62</b>
	<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>66</b>

---

# Capitolo 1

## Introduzione

Il Brasile è uno dei maggiori produttori di frutta al mondo, grazie al clima favorevole ed all'estensione del territorio. Tuttavia, la maggior parte della frutta è stagionale e allo stato maturo presenta alta deteriorabilità, rendendone più difficile il commercio come prodotto fresco e creando grosse perdite post-raccolta. In particolare il mango, oggetto del presente studio, è il frutto tropicale più coltivato, ma presenta un'eccedenza di produzione compresa tra il 30% e il 40% (Zotarelli, 2014). Una valida alternativa per lo sfruttamento della produzione eccedente è l'essiccamento della frutta, che può essere realizzato sul prodotto intero, in pezzi, o in forma di polpa o succo per la realizzazione di frutta in polvere. La frutta disidratata è un prodotto pratico, con minori costi di trasporto e stoccaggio, un'alta shelf-life e di facile utilizzo domestico e industriale. Gli alimenti in polvere hanno guadagnato un buon successo industriale per il fatto di essere ingredienti convenienti e sicuri nella produzione di diversi prodotti come succhi, dolci, creme, gelati, miscele di cereali, complessi vitaminici per sportivi e come aromi in generale. Ad ogni modo il processo di essiccazione deve garantire una perdita limitata delle caratteristiche nutrizionali e sensoriali.

Tra i diversi processi sviluppati per la produzione di alimenti in polvere si evidenziano l'essiccamento per atomizzazione (spray drying), per liofilizzazione (freeze drying) e a tamburo (drum drying). Ognuna di que-

## Introduzione

---

ste tecniche presenta vantaggi e svantaggi, ma tuttora non si conosce una tecnologia che riesca a produrre alimenti disidratati di alta qualità e che sia al contempo economicamente vantaggiosa.

Il metodo *Refractance Window*<sup>®</sup> è una tecnologia piuttosto recente e promettente per la produzione di alimenti disidratati in forma di film o polvere. Il prodotto da seccare è spalmato sotto forma di polpa o succo su di una membrana plastica che lo separa da un letto di acqua calda. Questa membrana è costituita da un film di PET trasparente a un buon intervallo di radiazione infrarossa, particolarmente a quella emessa dall'acqua calda. In questa maniera nel processo sono coinvolti radiazione, conduzione e convezione come meccanismi di trasferimento termico. Le temperature di processo non elevate e la bassa conduttività termica del film plastico limitano la conduzione. Nella sezione 11 è descritto in dettaglio e rappresentato con immagini il funzionamento di RW. Il punto forte della tecnologia è lo scambio termico tramite irraggiamento, ritenuto predominante rispetto alla conduzione e autolimitante in funzione dell'umidità del prodotto. Quando il letto di acqua è coperto dal solo film plastico, la radiazione infrarossa emessa dall'acqua è riflessa all'interno del letto dal film. Se la superficie superiore del film viene bagnata, il film si comporta da trasmettitore e la radiazione raggiunge il liquido soprastante; da qui il nome della tecnologia "finestra di rifrazione". Quando il liquido posto sopra il film è una polpa di frutta essa riceve la radiazione infrarossa fintanto che il suo contenuto in acqua è elevato, mentre una volta secca il film torna a comportarsi come uno specchio. In questo modo il prodotto secco non viene surriscaldato. Durante il processo la temperatura della polpa rimane inferiore a quella dell'acqua del letto sottostante, in questo modo si mantengono inalterati preziosi nutrienti e aspetti organolettici della frutta.

In letteratura si incontrano varie applicazioni di questo processo su diversi prodotti, in particolare Nindo and Tang (2007) e Abonyi (2002) mostrano che il sistema garantisce un alto mantenimento di colore, vitamine e antiossidanti nel prodotto dopo essiccamento. Il primo autore sostiene che in termini generali la qualità dei prodotti di RW è paragonabile a quella dei liofilizzati, rispetto ai quali però il costo di produzione è molto



---

inferiore. Tuttavia sono scarse le informazioni rispetto al meccanismo di trasporto termico, in particolare al contributo dell'irraggiamento rispetto alla conduzione, che per tutti gli autori viene assunto valido come presentato dai produttori. L'obiettivo di questo lavoro è l'approfondimento delle singole vie di trasferimento di calore per evidenziare quanto la radiazione infrarossa sia effettivamente rilevante nel processo, e dimostrare quanto questa "finestra di rifrazione" sia importante.



# Capitolo 2

## Essiccamento e trasmissione del calore

In questo capitolo si introducono l'essiccamento come tecnica di disidratazione di prodotti ad alto contenuto di acqua, e se ne illustrano le principali tecnologie, e il trasporto termico in quanto fenomeno fondamentale in qualsiasi processo di essiccamento.

### 2.1 L'essiccamento

La separazione di miscele chimiche nelle sue componenti è praticata da millenni da diverse civiltà e ha fornito un importante contributo allo sviluppo economico ed umano. A partire dall'antichità con la separazione dei primi metalli da minerali, l'evaporazione di acqua marina per ottenere il sale, l'estrazione di colori dalle piante, si sono sviluppate negli anni innumerevoli tecnologie che ormai trovano largo impiego nelle attività produttive. Queste operazioni di separazione consistono nell'intervento umano con impiego di energia per contrastare il naturale processo per il quale le sostanze tendono a mescolarsi spontaneamente tra loro. Il più diffuso procedimento di separazione al giorno d'oggi è la distillazione, largamente usata in campo petrolifero, ma non meno importanti sono filtrazione, as-

## Essiccamento e trasmissione del calore

---

sorbimento, essiccazione, evaporazione, cristallizzazione, centrifugazione, decantazione, estrazioni con solvente, cromatografia.

L'essiccamento è l'operazione unitaria in cui una fase liquida è rimossa da un substrato solido attraverso somministrazione di calore, con un prodotto solido come risultato. Probabilmente l'operazione unitaria dell'ingegneria chimica più antica, più comune e più diversificata, che conta su moltissime metodologie differenti. Il processo compete con la distillazione in quanto a consumi di energia, per via dell'elevato calore latente di evaporazione dell'acqua, il solvente più comunemente rimosso (Mujumdar, 2006). L'obiettivo principale dell'essiccamento è l'abbattimento dello sviluppo microbico attraverso la riduzione dell'attività dell'acqua. Un alimento totalmente secco e perfettamente conservato manifesta, in linea teorica, una shelf-life infinita. Inoltre con il processo si riducono il peso ed il volume del prodotto, il che si traduce in risparmi di trasporto e stoccaggio. Ogni metodo presenta i propri limiti nel consumo di energia o nella qualità del prodotto finito. Manca ancora una tecnologia energeticamente efficiente associata a prodotti di alta qualità, benché sia riconosciuta l'importanza del processo di essiccamento e ne esistano molteplici tecniche. Anche altri fattori come i tempi operativi e i costi d'investimento possono essere importanti nella scelta della tecnologia da adottare.

Le tecniche di disidratazione più comuni includono essiccamento solare, a piatti con aria calda, drum drying, spray drying e freeze-drying. Gli essiccamenti al sole o con aria calda comportano significative perdite in vitamina C, di colore e nella capacità di reidratazione rendendo il prodotto meno appetibile. Queste tecniche sono indubbiamente le più antiche e semplici, ma scarsamente utilizzate dall'industria, che preferisce le altre tecnologie citate.

Di seguito si elencano le tecniche più diffuse nell'industria e il RW che è argomento di questa tesi ma non ricopre tuttora un ruolo importante nel mercato.

### 2.1.1 Drum Drying

Sviluppata e utilizzata per prodotti liquidi, questa tecnica comporta rilevanti perdite di qualità del prodotto a causa della sua esposizione ad alte temperature (120° - 170°C). Il materiale, in forma liquida o pastosa è distribuito uniformemente in strato sottile su di un tamburo rotante scaldato internamente da vapore. Lo spessore del prodotto è critico per ottimizzare il processo che è limitato dalla diffusione del vapore all'interno del materiale: deve quindi essere sufficientemente sottile. Dal punto di vista dell'efficienza energetica il Drum Drying è tra le tecnologie migliori, soprattutto per liquidi ad alta viscosità o puree. L'efficienza energetica varia tra il 70 e il 90%, per questo tale metodo è largamente utilizzato, sebbene spesso non garantisca prodotti dalle elevate caratteristiche qualitative. Una variante per migliorare il prodotto è quella di lavorare a basse pressioni, per permettere una rapida evaporazione dell'acqua a temperature inferiori. Questo va però a incidere sui costi di installazione ed operativi, limitando l'utilizzo a particolari prodotti dall'alto valore aggiunto, o che non possono essere essiccati in altre maniere.

Tra i vantaggi del Drum Drying si evidenziano (Tang et al., 2003):

- elevata porosità del prodotto a causa dell'evaporazione a temperatura di ebollizione, il che rende più omogenea la reidratazione;
- facilità di essiccazione di prodotti con alta viscosità come paste e gelatine;
- alta efficienza energetica;
- semplice manutenzione, pulizia e igienizzazione;
- buona elasticità di produzione al variare della quantità o tipologia di prodotto.

Mentre i punti a sfavore più rilevanti sono:

- difficoltà di adesione al tamburo per alcuni prodotti;

## Essiccamento e trasmissione del calore

---

- difficoltà di rimozione del prodotto secco per i liquidi ad alto contenuto zuccherino a causa della caramellizzazione;
- alterazione di colore, sapore e caratteristiche organolettiche a causa del contatto con una superficie ad alta temperatura;
- scarsa applicabilità a prodotti eccessivamente salini o corrosivi.

### 2.1.2 Spray Drying

Tecnica adatta a prodotti termosensibili come alimenti e farmaci. Un liquido viene evaporato molto velocemente da un flusso di aria calda, generando polvere secca. Il materiale liquido, che può essere una soluzione o una sospensione fluida viene alimentato in un atomizzatore il quale lo distribuisce sotto forma di spray all'interno di un serbatoio in cui fluisce aria calda e secca. La forma di spray aumenta notevolmente la superficie di contatto tra liquido e aria permettendo una rapida evaporazione del solvente volatile e quindi un ridotto tempo di permanenza. La temperatura dell'aria è piuttosto elevata (150°-300°C), tuttavia essendo ogni goccia circondata da vapore, la temperatura del solido è sempre mantenuta inferiore a quella dell'aria (Dean, 1985). La polvere creata è trasportata dall'aria ad un ciclone che provvede alla loro separazione. Alcune particelle, più pesanti, non vengono trascinate dall'aria per via del loro peso e cadono al fondo del serbatoio, dove vengono raccolte. Queste particelle presenteranno maggiori perdite di sostanze termosensibili in quanto entrano a contatto con le pareti del serbatoio surriscaldate. È infatti buona regola che la polvere creata sia già secca se entra a contatto con le pareti per evitare aderenza, quindi alti tempi di contatto. Questo problema si verifica soprattutto per prodotti ricchi in zuccheri e acidi organici, come la frutta. Questi prodotti presentano una temperatura di transizione vetrosa piuttosto bassa in relazione alle temperature di processo e si trovano quindi in uno stato viscoso che aumenta l'adesione alle pareti. Il problema è generalmente risolto con l'utilizzo di additivi ad alta massa molare, come

ad esempio maltodestrina, la quale non sempre è desiderata nel prodotto finale. I principali vantaggi di questa tecnologia sono:

- possibilità di essiccare sostanze termosensibili;
- ottenimento di prodotti finiti pronti per l'imballaggio, senza interventi di macinatura;
- ottenimento di prodotti di qualità, omogenei e dalla forma sferica;
- possibilità di controllo delle proprietà del prodotto come dimensione particelle, densità agendo sul grado di atomizzazione;
- brevi tempi di permanenza;
- possibilità di lavorare sostanze corrosive.

I lati negativi invece sono sostanzialmente:

- alti costi di installazione;
- grande perdita di componenti volatili a causa dell'alta temperatura dell'aria;
- necessità di materia prima molto umida;
- alcuni prodotti sono sensibili all'elevato sforzo di taglio;
- necessità di aria modificata per i prodotti sensibili all'ossidazione;
- aderenza alle pareti dei prodotti zuccherini sottoposti a riscaldamento.

### 2.1.3 Freeze Drying

Comunemente chiamata liofilizzazione, è tuttora la tecnologia che presenta il miglior prodotto secco, con buona conservazione della forma, colore, sapore, contenuto in vitamine e ottima capacità di reidratazione. Particolarmente usata per prodotti particolarmente sensibili al calore e ad alto

## Essiccamento e trasmissione del calore

---

valore aggiunto come prodotti farmaceutici o alimentari, visti gli elevati costi operativi e di impianto. Il processo si basa su due importanti trasformazioni fisiche, la surgelazione e la sublimazione. Infatti, a differenza dei tradizionali metodi di essiccamento, non si aumenta la temperatura del materiale, ma la si diminuisce rapidamente al fine di ottenere lo stato solido. Successivamente l'acqua viene fatta sublimare allo stato gassoso fornendo calore a bassa pressione. Molto importante è la velocità del processo di congelamento che, se troppo lento, crea cristalli di ghiaccio irregolari e molto grandi che rompono la struttura originaria del tessuto, mentre se troppo rapido crea una struttura cristallina molto fitta che ostacola la sublimazione. Il passo successivo consiste nella diminuzione della pressione al di sotto del punto triplo del solvente, il quale sublima ed è rimosso sotto forma di vapore. Il calore latente di sublimazione è solitamente fornito per conduzione mediante piastre metalliche percorse internamente da olio caldo. Il vapore formato non può essere rimosso da una pompa a vuoto per via dell'elevato volume, per cui è preferibile l'estrazione del vapore per condensazione su una superficie refrigerata, sulla quale esso si raccoglie in forma solida. I condensatori devono sempre garantire una pressione parziale del vapore nella camera di essiccazione inferiore alla pressione parziale del vapore nel prodotto. Al termine di questo processo il prodotto presenta ancora livelli di umidità non adatti alla conservazione a temperatura ambiente (fino al 5%) per cui si effettua un ulteriore essiccamento a temperatura superiore (comunque non sopra i 60°C) e pressione ridotta, al fine di raggiungere livelli di umidità inferiori al 3%). La pressione è successivamente ristabilita con gas inerti, solitamente azoto, prima del confezionamento. Il processo può durare da alcune ore fino a giorni interi a seconda della natura del prodotto. Principali vantaggi del Freeze Drying sono:

- eccellente risultato in aroma, colore sapore e nutrienti;
- minime modifiche strutturali;
- rapida e completa reidratabilità.



L'unico svantaggio rilevante è costituito dagli elevati costi operativi legati ai vari processi energivori coinvolti: surgelazione, sublimazione, rimozione dell'acqua, i quali richiedono ognuno impianti dedicati che pesano sui costi di installazione.

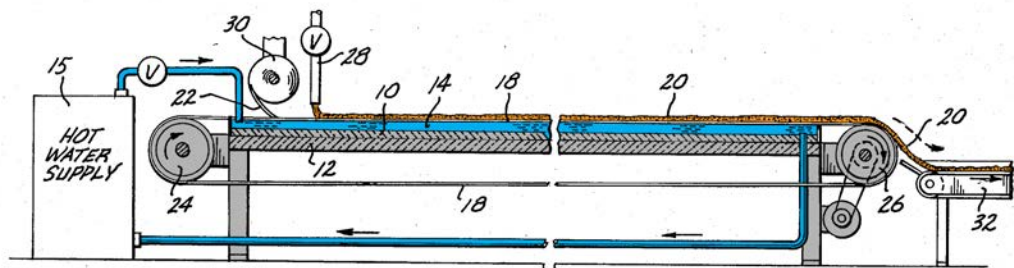
### 2.1.4 Refractance Window

Il Refractance Window (RW) è una tecnica per l'essiccamento di alimenti o altri materiali liquidi o semiliquidi, con formazione di polveri, fiocchi, granuli o film. Brevettata da Magoon (1986) e sviluppata da MTD Technologies, Inc. (Tacoma, Washington, USA), la tecnologia sta avendo successo nelle industrie alimentari perché il prodotto disidratato mantiene ottime caratteristiche e l'installazione è relativamente economica. Il costo d'impianto del Refractance Window è approssimativamente tra un terzo e la metà di quello di un Freeze Dryer di pari capacità produttiva, mentre i costi operativi sono inferiori alla metà, paragonabili a quelli del Drum Dryer (Nindo and Tang, 2007).

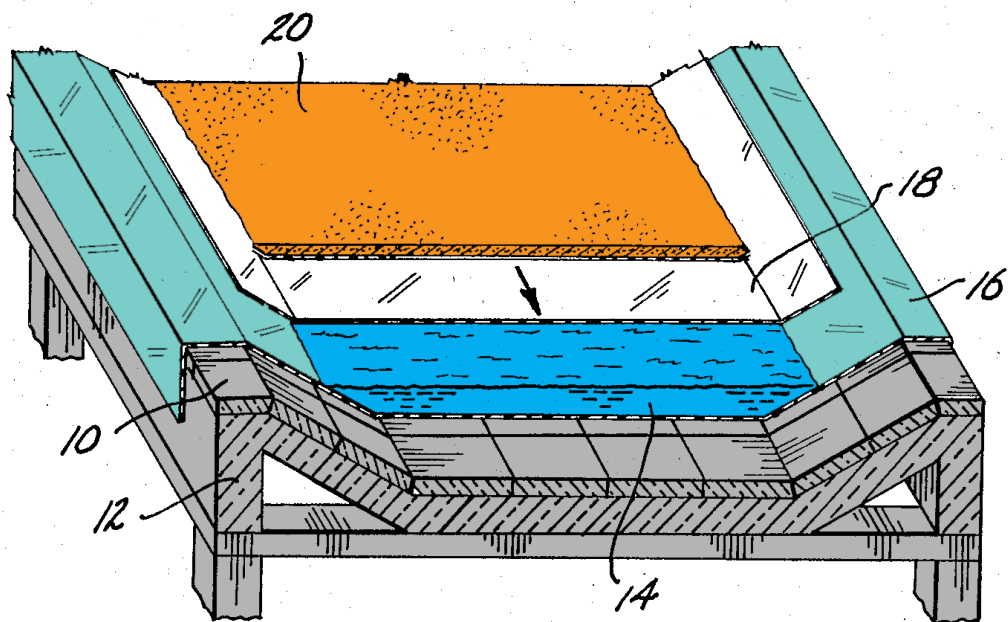
Il sistema RW in continuo utilizza acqua calda circolante a pressione atmosferica per fornire l'energia termica al materiale da disidratare. In figura 2.1 è riportata la raffigurazione dell'impianto Refractance Window presente sul brevetto (i colori sono stati aggiunti per migliorare la comprensione).

La temperatura è mantenuta più vicino possibile all'ebollizione, evitando però la formazione di bolle, che comprometterebbero lo scambio termico. Il calore è trasferito al materiale umido attraverso un nastro plastico in movimento con particolari caratteristiche di trasparenza alla radiazione infrarossa. Secondo il brevetto depositato il film plastico è costituito di *Mylar*<sup>®</sup> tipo "300A", e ha uno spessore di 3 *mils*, ossia 0.076 mm (Magoon, 1986). Questo polimero presenta le caratteristiche di bassa deformazione nel campo di temperatura d'interesse, flessibilità a sufficienza per poter essere usato come nastro trasportatore e resistenza all'usura nel tempo. Il prodotto da essiccare, che può essere un succo, una purea o una sospensione, viene spalmato uniformemente sul nastro trasportatore. Lo

## Essiccamento e trasmissione del calore



(a) Sezione laterale.



(b) Vista in prospettiva.

**Figura 2.1:** Impianto di essiccamento Refractance Window. Nel particolare si vedono: 10,12: struttura metallica; 14: acqua di servizio; 16: isolante; 18: film di Mylar; 20: polpa da essiccare.

spessore del materiale spalmato dipende dal prodotto finale richiesto, ad ogni modo, sempre secondo il brevetto ufficiale uno spessore compreso tra 3 e 4.5 *mm* garantisce un risultato soddisfacente. Il sistema è quindi formato da un nastro di plastica rotante che separa l'acqua di servizio calda dal prodotto da seccare. L'acqua di servizio è riciclata, riscaldata e riusata,. L'umidità prodotta dall'evaporazione è rimossa da sistemi aspiranti. Prima della rimozione il prodotto secco può eventualmente venire raffreddato facendo fluire acqua fredda sotto al nastro di *Mylar*<sup>®</sup> al fine di evitare degradazione termica e facilitare la rimozione. L'utilizzo di acqua calda come fluido di servizio termico ad una temperatura prossima all'ebollizione è una caratteristica progettuale unica di questo metodo di essiccamento. La temperatura del prodotto da essiccare è mantenuta moderata durante il processo grazie all'effetto di raffreddamento dovuto all'evaporazione: questo garantisce la conservazione delle componenti termosensibili. Secondo quanto affermato dai produttori (appendice C) il punto forte del brevetto consiste nel passaggio di energia termica per irraggiamento attraverso il film plastico alla velocità della luce. La finestra (window) a cui ci si riferisce indica un'apertura alla radiazione infrarossa solamente nel momento in cui entrambe le superfici sono bagnate dall'acqua, quindi quando il prodotto in superficie ha un alto tasso di umidità. Il passaggio di calore è autolimitante per via della natura della rifrazione: quando il prodotto si disidrata la finestra che permette il passaggio della radiazione si chiude. Il calore a questo punto può passare solo per conduzione, che è minima e garantisce l'evaporazione dell'ultima umidità contenuta. Anche secondo Nindo and Tang (2007) la trasmissione di radiazione infrarossa è nettamente maggiore quando l'interfaccia plastica si trova in intimo contatto con l'acqua su un lato e con il materiale umido sull'altro lato: quando una purea ad alto contenuto di umidità è distribuita sulla superficie plastica l'energia termica radiante trasmessa attraverso il film è massima, mentre quella riflessa è minima. L'assorbimento termico della purea è influenzato quindi, oltre che dallo spessore della stessa, dal suo grado di umidità. Quando il prodotto inizia ad avere un'umidità piuttosto bassa, il trasferimento termico per conduzione diventa predominante

## Essiccamento e trasmissione del calore

---

e la velocità di essiccamento diminuisce gradualmente. In un esperimento svolto dagli autori con purea di fragole, il prodotto si è seccato in meno di 5 minuti, a differenza delle ore richieste nel Freeze Drying. L'elevata evaporazione crea un alto grado di saturazione del vapore sopra al prodotto che ne limita il contatto con l'ossigeno evitando così reazioni di ossidazione indesiderate. I brevi tempi di residenza sembra che contribuiscano pure all'ottima capacità di reidratazione del prodotto secco. L'essiccamento con RW è risultato particolarmente efficiente per la lavorazione di frutta e ortaggi, soprattutto riguardo alla ritenzione dei composti naturali e alla qualità del prodotto finale (Clarke, 2004).

Al giorno d'oggi il *Refractance Window*<sup>®</sup> è industrialmente utilizzato per disidratare miscele di uova, avocado per salse, alghe ad alto contenuto di carotenoidi, estratti di piante ed erbe medicinali per uso umano e varie spezie (Nindo and Tang, 2007). Per un essiccamento efficiente le polpe da seccare devono già avere una corretta consistenza per essere applicate facilmente e distribuite in modo uniforme sul nastro trasportatore plastico.

In letteratura si trovano numerose pubblicazioni relative al *Refractance Window*<sup>®</sup> (Kudra and Mujumdar, 2009; Clarke, 2004; Zotarelli, 2014), con molti risultati sulla qualità dei prodotti essiccati e sui costi energetici. Sempre si parla del trasferimento termico per conduzione e irraggiamento, tuttavia il preciso contributo di ognuno di questi modi non è ancora stato studiato.

## 2.2 Trasmissione del calore

Le operazioni di essiccamento ed evaporazione di qualsiasi natura siano richiedono sempre energia per allontanare la parte liquida da quella solida. L'energia è trasferita al materiale sotto forma di calore, in quantità tale da permettere al liquido di passare allo stato gassoso. Nella maggior parte dei casi il liquido in questione è l'acqua, e questa presenta un calore latente di evaporazione piuttosto elevato, ossia richiede una grande quantità di energia per passare dallo stato liquido a quello gassoso (2272 kJ/kg). Il trasferimento di calore interessa due importantissime grandezze fisiche, la temperatura ed il flusso di calore. La temperatura rappresenta la quantità di energia termica disponibile, mentre il flusso di calore rappresenta il movimento dell'energia termica tra diversi volumi o superfici. A livelli microscopici l'energia termica è correlata all'energia cinetica delle molecole. Quanto maggiore è la temperatura di un materiale, quanto più si trovano agitate le molecole che lo compongono. In natura avviene spontaneamente il passaggio di energia da regioni ad alto movimento molecolare a regioni di minore agitazione molecolare. Questo passaggio di energia, ossia il flusso di calore, si manifesta principalmente in 3 modi: conduzione, convezione e irraggiamento, i quali possono avvenire contemporaneamente o in forma distinta.

### 2.2.1 Conduzione

La conduzione termica è il flusso di calore indipendente dal flusso di massa del materiale. Le regioni ad alta energia cinetica molecolare trasferiscono energia termica alle regioni di minor energia cinetica molecolare attraverso collisioni dirette delle particelle. Per essere più precisi il processo avviene in maniera differente a seconda del materiale interessato e dal suo stato. Nei gas la conduzione termica è dovuta alla diffusione molecolare, nei liquidi e in alcuni solidi è dovuta a onde elastiche, mentre nei metalli è predominante il contributo dovuto alla diffusione degli elettroni liberi. Questi elettroni liberi sono ottimi trasportatori di energia termica

## Essiccamento e trasmissione del calore

---

quanto di energia elettrica, per questo è una caratteristica comune dei metalli abbondanti in elettroni liberi, quali argento o rame, essere eccellenti conduttori di calore ed elettricità. A parte lo stato fisico, materiali diversi conducono il calore in quantità differente, quantità che è espressa dalla conducibilità termica. Nello specifico la conducibilità esprime il rapporto tra il flusso di calore e il gradiente di temperatura. Un materiale che presenta alti valori di conducibilità ( $> 100 \frac{W}{mK}$ ) è detto conduttivo, al contrario bassi valori ( $\ll 1 \frac{W}{mK}$ ) sono tipici di un materiale isolante. L'importanza di questa proprietà si ritrova nella formula fondamentale della conduzione, la legge di Fourier:

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (2.1)$$

dove

$\vec{q}$  è il flusso di calore locale,  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$k$  è la conducibilità del materiale,  $\left[ \frac{W}{mK} \right]$

$\nabla T$  è il gradiente di temperatura,  $\left[ \frac{K}{m} \right]$ .

La formula, in forma tridimensionale, è valida per materiali isotropici, ossia che non presentano direzioni preferenziali per il flusso di calore. Inoltre, in numerosi casi, la legge è semplificata per situazioni monodimensionali o per geometrie particolari e portata alla forma integrale per materiali omogenei (se  $k$  non varia molto con  $T$ ). Nel caso invece di materiali anisotropi, come possono essere fibre, cristalli o lamine, la formula presenta la stessa forma ma la  $k$  sarà un tensore del secondo ordine chiamato *tensore di conducibilità termica* (Bird et al., 2007); ma questo caso non interessa questa tesi.

### 2.2.2 Convezione

La convezione consiste nel trasferimento di energia da un luogo ad un altro dovuto ad un flusso di massa a livello macroscopico. L'energia termica è trasportata dalla materia in movimento, non si muove all'interno di essa, per questo motivo questo fenomeno è tipico dei fluidi, non può

## 2.2 Trasmissione del calore

---

avvenire nei solidi in quanto le molecole non sono in grado di muoversi liberamente. La convezione è solitamente suddivisa in due categorie, in quanto essa può avvenire naturalmente o essere forzata da un intervento esterno.

Quando si riscalda un fluido statico questo espande in volume, quindi diminuisce in densità. Per via del gradiente di pressione indotto dalla forza di gravità, il volume di fluido espanso tende a "galleggiare" muovendosi verso l'alto e portando con sé il calore accumulato. Tale flusso di calore è detto *convezione naturale*. La cosiddetta *convezione forzata* è invece la convezione dovuta a un movimento indotto da un agente esterno, ad esempio una pompa in caso di liquido o una ventola in caso di gas. Caratteristica importante della convezione è il tipo di moto che interessa il fluido in questione: solitamente una convezione naturale induce un moto laminare, mentre una convezione forzata può essere progettata per creare il moto desiderato (Greenkorn and Kessler, 1999). L'esperienza mostra che la trasmissione termica per convezione dipende fortemente dalle proprietà del fluido (viscosità dinamica, conducibilità termica, densità e calore specifico) come pure dalla velocità del fluido. Essa dipende pure dalla geometria e rugosità della superficie solida oltre che dal tipo di moto del fluido (laminare o turbolento). Malgrado la complessità della convezione la potenza termica trasmessa, che è proporzionale alla differenza di temperatura, si può esprimere con la legge di Newton per la convezione (Çengel et al., 2013):

$$\vec{q} = h\Delta T \quad (2.2)$$

dove

$\vec{q}$  è il flusso di calore locale,  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$h$  è il coefficiente di convezione,  $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$

$\Delta T$  è la differenza di temperatura tra il fluido in movimento e la superficie ferma lambita dal fluido,  $[K]$ .

### 2.2.3 Irraggiamento

Con la parola irraggiamento si definisce il trasferimento di energia attraverso onde elettromagnetiche. Qualsiasi materiale, a temperatura non nulla, emette e assorbe continuamente onde elettromagnetiche, o fotoni, diminuendo o aumentando i livelli energetici delle proprie molecole. L'energia e le lunghezze d'onda emesse dipendono in primo luogo dalla temperatura del materiale emittente (Modest, 2013). La radiazione elettromagnetica che corrisponde alla trasmissione del calore è la radiazione termica emessa a causa dei moti vibratorii e rotatori delle molecole, atomi e elettroni di una sostanza. Poiché la temperatura è una misura dell'intensità di questi processi a livello microscopico, all'aumentare della temperatura aumenta l'emissione di radiazione termica. Come illustrato in figura 2.2 la radiazione termica comprende onde infrarosse, visibili e in parte ultraviolette, tuttavia nei normali problemi ingegneristici non si esce dal campo infrarosso, frequenze maggiori interessano alte temperature (migliaia di K).

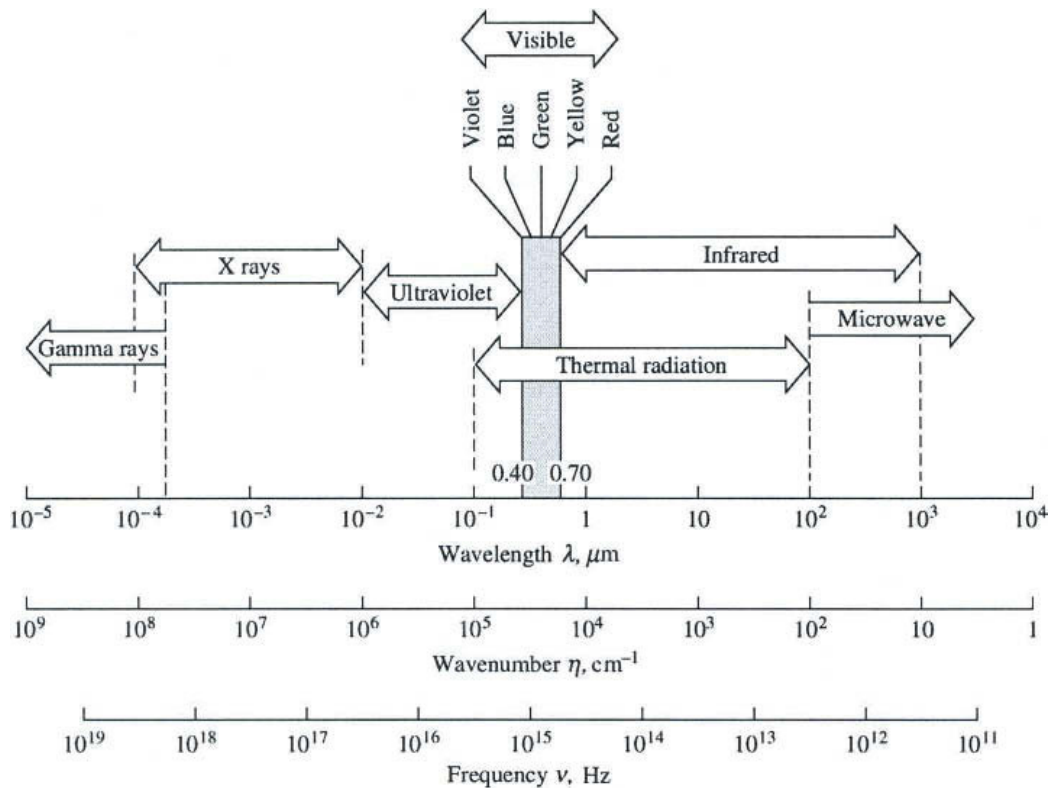
L'irraggiamento presenta alcune caratteristiche fisiche che lo distinguono dai trasferimenti termici precedentemente descritti. Le onde elettromagnetiche possono viaggiare per lunghe distanze senza interagire con mezzi fisici, avendo la massima efficienza di trasferimento nel vuoto, a differenza della conduzione e della convezione che sono fenomeni strettamente legati alla presenza di un mezzo materiale. Altra caratteristica che differenzia l'irraggiamento è la dipendenza dalla temperatura: mentre conduzione e convezione sono direttamente proporzionali a  $T$ , l'irraggiamento è legato alla quarta potenza come appare evidente dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$E_B = \sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

dove  $T_s$  è la temperatura (K) della superficie e  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ).  $E_B$  esprime la massima potenza irradiata, raggiungibile quando l'emettitore è un corpo nero. La radiazione emessa da qualsiasi superficie è sempre inferiore a quella del corpo nero e



## 2.2 Trasmissione del calore



**Figura 2.2:** Spettro delle onde elettromagnetiche (Modest, 2013)

è data da:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.4)$$

dove  $\epsilon$  è una proprietà del materiale chiamata emissività. Con valori compresi tra 0 e 1 questa proprietà è definita come l'efficienza di emissione di un materiale rispetto al corpo nero. Quando si considera la radiazione infrarossa la gran parte dei metalli (non ossidati) sono deboli emettitori, quindi hanno un valore di emissività molto basso ( $< 0,1$ ). Per contro carta, plastica, legno, vernici presentano valori di emissività prossimi all'unità ( $> 0,8$ ). La proprietà non è tuttavia costante per un materiale ma è sempre funzione di temperatura e lunghezza d'onda, per cui materiali che possono essere pessimi emettitori nel campo infrarossi potrebbero non esserlo per le microonde, oppure ottimi emettitori ad una temperatura potrebbero non esserlo a temperature diverse.

Quando un corpo emette radiazione, diminuisce la propria energia

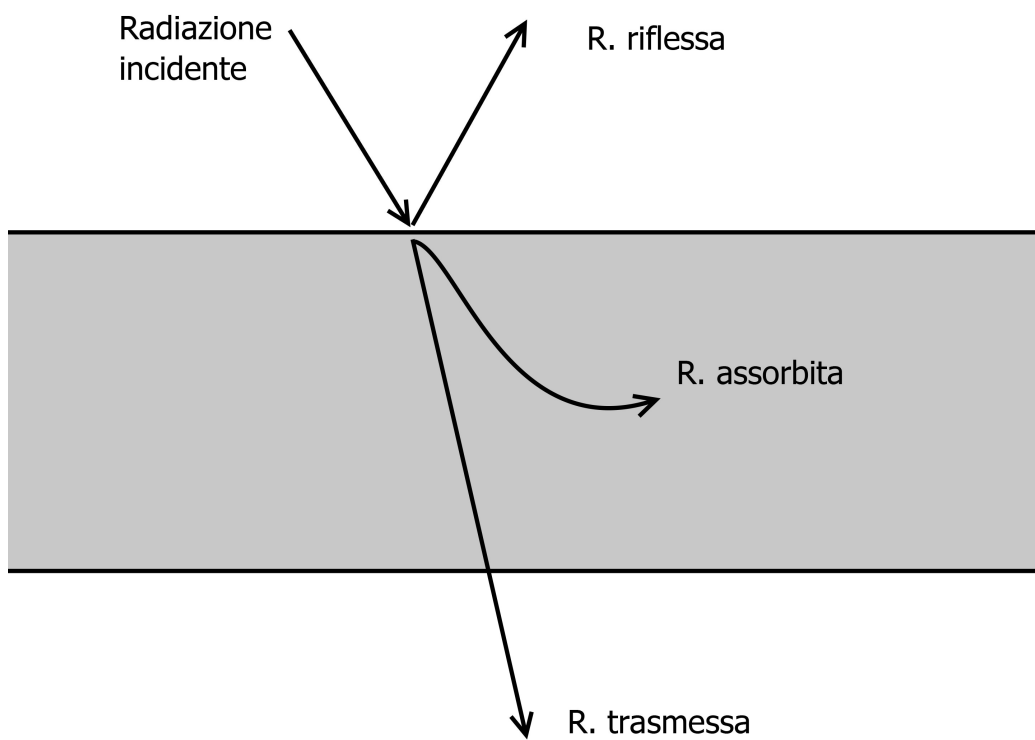
## Essiccamento e trasmissione del calore

---

termica, mentre quando assorbe radiazione aumenta la propria energia. La capacità di un materiale di assorbire radiazione è detta assorbanza ( $\alpha$ ), ed è, al pari dell'emissività, funzione di temperatura e frequenza. I corpi ideali per cui l'emissività e l'assorbanza sono assunte costanti sono detti corpi grigi e per loro è sempre valida  $\epsilon = \alpha$ . Nel particolare caso del corpo nero  $\epsilon = \alpha = 1$ ; la dimostrazione, seguendo la legge di Kirchhoff si trova in Modest (2013). Se l'assorbanza è  $<1$  e la superficie è opaca parte della radiazione viene riflessa. Se la superficie è semitrasparente una parte di radiazione attraversa il mezzo, si dice quindi che viene trasmessa. Le grandezze che esprimono la frazione di radiazione riflessa e trasmessa sono rispettivamente riflettanza ( $\rho$ ) e trasmittanza ( $\tau$ ). Per il principio di conservazione dell'energia è sempre valida:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.5)$$

dimostrabile facilmente in quanto la parte totale (unitaria) di una radiazione incidente su un mezzo si divide in parte assorbita, parte riflessa e parte trasmessa, come rappresentato in figura 2.3. In termini molto generali i liquidi possono essere considerati opachi e i gas trasparenti alla radiazione termica. I solidi sono generalmente opachi, oppure semitrasparenti nel caso di sottili film polimerici o di alcuni materiali semiconduttori.



**Figura 2.3:** Fenomeni sviluppati da una radiazione incidente su una superficie qualsiasi



## Capitolo 3

### Materiali e metodi

Come anticipato, in letteratura sono presenti numerose pubblicazioni su *Refractance Window*<sup>®</sup>, ma la spiegazione di come avviene lo scambio termico è molto scarna e quasi sempre ripete quanto affermato dal produttore. In particolare si parla di quanto sia importante la "finestra di rifrazione", la quale permette il passaggio di radiazione infrarossa fintanto che il prodotto è umido, mentre riflette la radiazione quando il prodotto è secco. Questo è enfatizzato come punto di forza della tecnologia, che permette di evitare il surriscaldamento del prodotto secco, evitandone la degradazione; ma si fa poco riferimento alla conduzione termica, come se questa fosse irrilevante nel trasferimento di calore.

Lo scopo principale di questo lavoro è un'analisi più approfondita sul trasferimento di calore che avviene nella tecnica *Refractance Window*<sup>®</sup>. A tal fine si vuole verificare sperimentalmente e calcolare analiticamente il contributo dato dall'irraggiamento e quello dato dalla conduzione al calore totale trasferito, attraverso il film di *Mylar*<sup>®</sup>, dall'acqua di servizio al materiale da seccare.

#### 3.1 Impianto Refractance window

Nel laboratorio di proprietà fisiche degli alimenti dell'Università Federale di Santa Catarina (PROFI-EQA-UFSC), in Brasile, è stato creato un

## Materiali e metodi

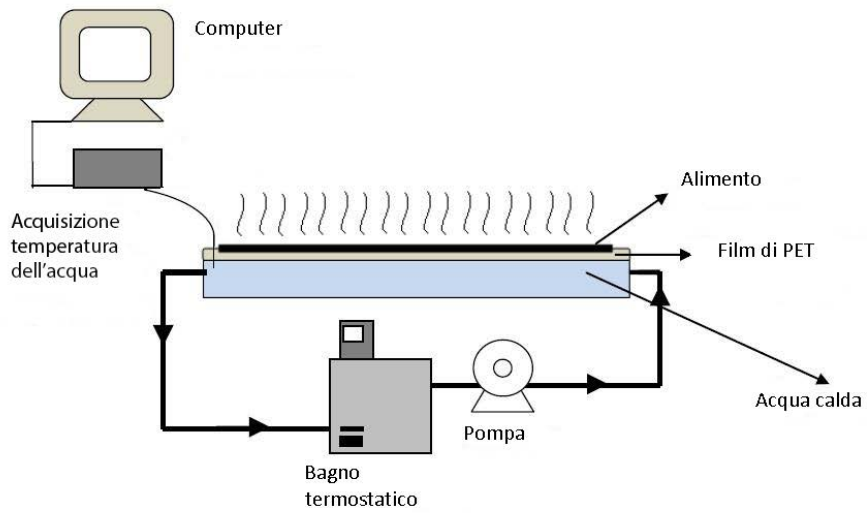
---

impianto *Refractance Window*<sup>®</sup> in piccola scala, rappresentato in figura 3.1 basato sullo stesso principio del brevetto industriale. Principale differenza del modello rispetto al brevetto è il funzionamento in discontinuo, il nastro in *Mylar*<sup>®</sup> è fermo ed il prodotto viene spalmato all'inizio dei test e rimosso al termine.

Il modello del RW consiste di un letto di acqua corrente, mantenuta a temperatura costante da un bagno termostatico, ricoperto di un film plastico. Il letto è costruito in acciaio e presenta delle pareti interne per creare un percorso obbligato all'acqua ed evitare flussi preferenziali che porterebbero a forti gradienti termici. Il letto è visibile in fotografia 3.2, ha un'altezza di 5 cm e misura 0.8 x 0.4 metri nel piano orizzontale. La temperatura dell'acqua di servizio è misurata da 8 termocoppie immerse in punti differenti e collegate, tramite un sistema di acquisizione dati, ad un computer. Si cerca di mantenere la portata d'acqua nei canali interni al RW sufficiente elevata da poter garantire una discreta uniformità della temperatura, evitando al contempo di alzare troppo la pressione che andrebbe a deformare la forma piana del foglio di *Refractance Window*<sup>®</sup>. Il film è mantenuto a contatto continuo con l'acqua calda di servizio, cercando di evitare la presenza di bolle d'aria che influenzerebbero sia la fluidodinamica che la "finestra di rifrazione" che si vuole simulare. Infatti, come sostenuto dai produttori del brevetto, l'irraggiamento è massimo quando entrambe le superfici del film plastico sono lambite da acqua, per cessare quando un lato si trova asciutto.

### 3.2 Il film in Mylar

Magoon per il suo brevetto di *Refractance window* vuole un film da porre tra acqua e substrato in grado di resistere alla temperatura senza deformarsi e che sia trasparente alla radiazione infrarossa (Magoon, 1986). La scelta che incontra questi requisiti è un poliestere della Dupont<sup>®</sup> chiamato *Mylar*<sup>®</sup> 300A. Nel modello di laboratorio si è utilizzato *Mylar*<sup>®</sup> di tipo D, che a differenza del precedente presenta maggiore trasparenza alla radia-



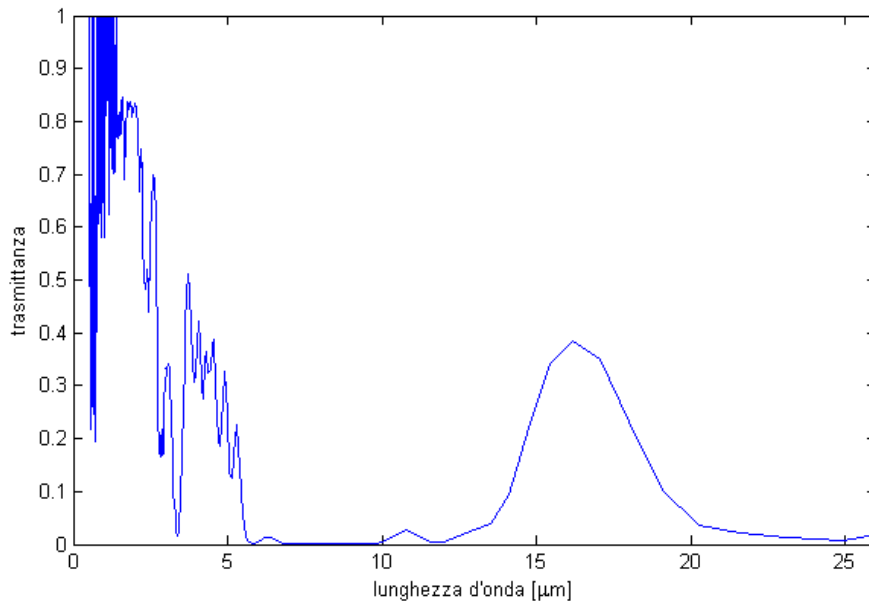
**Figura 3.1:** Rappresentazione dell'impianto rw realizzato in laboratorio



**Figura 3.2:** Fotografia del modello di RW creato in laboratorio

## Materiali e metodi

---



**Figura 3.3:** Analisi con spettrometro della trasmittanza di un campione di Mylar dello spessore di 0,25 mm

zione luminosa (DuPont, 2003a). Non è detto che maggior trasparenza luminosa significa anche maggior trasparenza agli infrarossi, quindi in laboratorio sono state eseguite analisi di trasmittanza su un campione di film con spessore di 0,25 mm utilizzando uno spettrometro FTIR<sup>1</sup>. Queste prove permettono di misurare lo spettro dell'infrarosso che riesce a trapassare il campione di *Mylar*<sup>®</sup>, per ricavare la trasmittanza, ossia il rapporto tra l'ampiezza dell'onda passante rispetto a quella incidente, graficata in figura 3.3. Lo spettrometro utilizzato permette l'analisi nel solo spettro elettromagnetico compreso tra 0,5 e 25 micrometri di lunghezza d'onda, per via di limiti costruttivi.

I risultati permettono di osservare che il *Mylar*<sup>®</sup> presenta picchi di alta trasmittanza per lunghezze d'onda comprese tra i 2 e i 6  $\mu\text{m}$  e tra i 14 e i 19  $\mu\text{m}$ . Tuttavia va considerato che se il film plastico è lambito da acqua il coefficiente di trasmissione, quindi la trasmittanza, assume valori differenti, per via dei diversi indici di rifrazione di acqua e aria. Infatti,

---

<sup>1</sup>Oriel MIR8025TM Modular IR Fourier Spectrometer



quando un'onda elettromagnetica incide su un materiale, parte di essa viene riflessa. La quantità di luce che viene riflessa dipende dalla riflettanza della superficie. Tale grandezza può essere calcolata a partire dall'indice di rifrazione e dall'angolo di incidenza per mezzo dell'equazione di Fresnel, secondo la quale la componente normale della riflessione viene ridotta a (Siegel and Howell, 1968):

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 \quad (3.1)$$

dove  $n_1$  e  $n_2$  sono gli indici di rifrazione dei due materiali a contatto. Gli indici di rifrazione di aria, acqua e Mylar<sup>®</sup> sono rispettivamente circa di 1, 1.33 (Perry and Green, 2008), 1.65 (DuPont, 2003a); quindi, applicando la formula (3.1), si ottiene tra aria e Mylar<sup>®</sup> una riflessione del 6% mentre tra acqua e Mylar<sup>®</sup> un valore del 1%.

In accordo con la *legge dello spostamento* di Wien, secondo cui ad ogni temperatura corrisponde una lunghezza d'onda per cui è massima l'emissione radiativa di un corpo nero, alla temperatura di 100°C è associata la lunghezza d'onda di 8  $\mu m$ . Inoltre la parte predominante dell'emissione (80% della radiazione emessa) è compresa tra le lunghezze d'onda di 4 e 40  $\mu m$  (Incropera, 2006). L'acqua a queste temperature ha un valore di emissività di 0,96 (Perry and Green, 2008), per cui in prima approssimazione può essere considerato un corpo nero e seguire la legge di Wien.

### 3.3 Termocamera FLIR T360

Per le misure della temperatura superficiale del prodotto in essicca-mento è stata utilizzata una termocamera, in particolare il modello T360 della FLIR<sup>®</sup>, visibile in figura 3.4. La scelta nasce dalla ovvia complessità nell'utilizzo di termocoppie per questo tipo di misure. La termocamera, è un particolare tipo di telecamera sensibile alla radiazione infrarossa invece che alla luce visibile. Se una macchina fotografica tradizionale è costruita per catturare le lunghezze d'onda comprese tra i 470 e i 750 nanometri

## Materiali e metodi

---

(o eventualmente un range poco più ampio), la macchina termografica in questione è in grado di catturare le lunghezze d'onda comprese tra i 7.5 e i 13 micrometri. Questo intervallo coincide con la regione di onde infrarosse lunghe, la banda più comunemente utilizzata per misure termiche a temperature ambientali (in particolare coglie temperature comprese tra  $-20^{\circ}$  e  $+650^{\circ}\text{C}$ ). Lunghezze inferiori sono utilizzate per alte temperatura, spettrografie per l'analisi di gas e immagini satellitari, mentre lunghezze d'onda maggiori sono analizzate per la misura di basse temperature o osservazioni astronomiche. In realtà la termocamera utilizzata cattura entrambi i range di frequenze, creando ad ogni scatto una fotografia ed una termografia, come si può osservare in figura 3.5.

Questo tipo di misura è chiaramente indiretto: la termocamera non è in grado di "vedere" la temperatura in ogni punto dell'immagine ma quanta radiazione infrarossa proviene da quel punto. Il calcolo della temperatura può essere svolto in automatico dalla camera o a posteriori dall'utilizzatore, in entrambi i casi sono necessari parametri quali l'emissività dell'oggetto in quadrato e la temperatura ambiente.

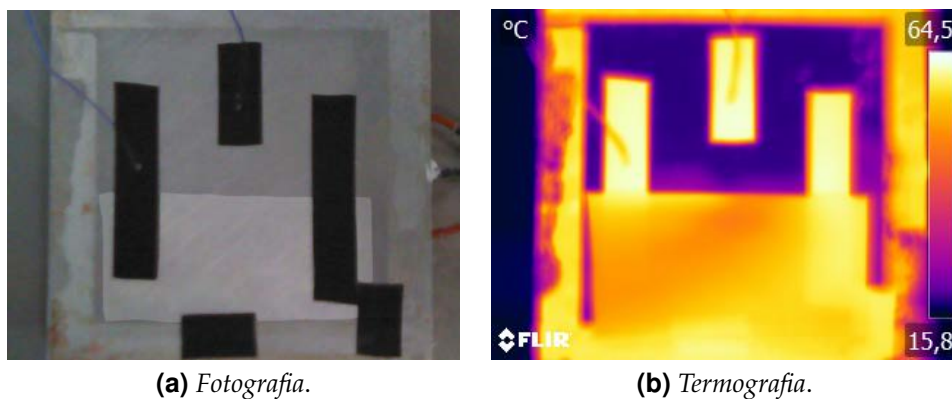
In una termografia oggetti differenti che si trovano a temperature simili possono sembrare a temperature molto diverse per via della loro diversa emissività. In figura 3.5 (b) si nota che la parte dell'immagine di colore viola è molto più fredda delle parti gialle (si veda la legenda a lato). In realtà l'oggetto nell'immagine si trova ad una temperatura pressoché uniforme di circa  $65^{\circ}\text{C}$ , sono le parti metalliche ad apparire fredde rispetto al nastro isolante ed al foglio di *Mylar*<sup>®</sup> appoggiati in superficie.

### 3.4 Essiccamento del mango

I test de essiccamento sono eseguiti con succo di mango di varietà Tommy Atkins, coltivato nella regione di Santa Catarina, Brasile. Sono stati preparati 10 kg di succo lavando e sbucciando manualmente i frutti, e frullando la polpa con un frullatore casalingo. Il succo è stato filtrato, miscelato e confezionato in buste da 1 kg sottovuoto e congelate in modo di dispor-



**Figura 3.4:** Termocamera FLIR®T360, utilizzata per le misure termiche



**(a)** Fotografia.

**(b)** Termografia.

**Figura 3.5:** Esempio di scatto della FLIR®T360, nello specifico una piastra di alluminio riscaldata su cui è posto un pezzo di film di Mylar e del nastro isolante, per studiarne le emissività

## Materiali e metodi

---

re sempre della stessa materia prima per tutti gli esperimenti. La polpa ottenuta presenta un tenore di solidi solubili di 11°Brix, e un contenuto in acqua pari a 7 gH<sub>2</sub>O/gSECCO. Il succo è distribuito sulla superficie plastica del refractance window mediante un distributore costruito allo scopo di garantire una distribuzione omogenea allo spessore desiderato. In figura 3.6 si vede il mango distribuito sul refractance window da cui sono stati prelevati alcuni campioni.

Il succo viene distribuito con uno spessore uniforme di 2 o 3 mm quando la temperatura della superficie ha raggiunto lo stato stazionario. Appena spalmato il succo comincia ad assorbire calore e a cedere parte dell'acqua contenuta per evaporazione. A intervalli regolari vengono prelevati 3 campioni di alcuni grammi, che sono immediatamente pesati e del cui valore si farà successivamente la media. Le temperature dell'acqua di servizio per questi test sono state di 80°C e 90°C, mentre i test eseguiti con temperature maggiori (si ricordi che il RW lavora a temperatura prossima all'ebollizione) non sono ritenuti affidabili per l'elevata produzione di bolle all'interno del sistema. I test sono tutti eseguiti almeno due volte, con un terzo tentativo nel caso di eccessiva discordanza tra i risultati dei primi 2.

### 3.5 Contenuto di acqua

Le cinetiche di essiccamento sono ottenute dal valore di contenuto di acqua presente nel prodotto durante la fase di disidratazione. Il contenuto d'acqua dei campioni è determinato per analisi gravimetrica, in stufa a vuoto (TECNAL, TE-395) a 70°C, secondo il metodo A.O.A.C. (2005). Il contenuto in acqua in base secca dei campioni è quindi calcolata con l'equazione:

$$X = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \quad (3.2)$$

dove  $m_0$  e  $m_1$  sono la massa del campione prima e dopo l'essiccamento in stufa. Si ottengono quindi valori pari all'unità nel caso in cui la massa d'acqua è pari alla massa secca. Valori superiori indicano quante volte il contenuto di acqua supera il contenuto secco.

Il succo utilizzato negli esperimenti presenta in partenza un contenuto d'acqua pari a circa  $7 \text{ gH}_2\text{O/gSECCO}$ .

## 3.6 Piastra metallica

Al fine di ottenere dei confronti, vari test sono eseguiti anche su una piastra di alluminio. Questa piastra, visibile in figura 3.7, è costituita da una lamiera di alluminio forata per ottenere dei canali in cui scorre l'acqua di servizio (che per analogia è mantenuta alla stessa temperatura che negli esperimenti con RW). Sulla superficie superiore è posto lo stesso film di Mylar<sup>®</sup> usato nel RW. L'idea sostanziale è quella di creare un processo analogo, dove però il contatto Mylar<sup>®</sup>-acqua non è diretto. In questo modo si esclude dal processo buona parte dell'irraggiamento, ora molto basso per via della ridotta emissività dell'alluminio (come si vede nelle zone viola di figura 3.5).

Chiaramente questa alternativa presenta anche altre differenze. Ad esempio il contatto solido-solido tra l'alluminio e il film di Mylar<sup>®</sup>, a differenza del contatto liquido-solido, manifesta la cosiddetta resistenza di contatto, ossia una resistenza alla conduzione dovuta al sottile strato di aria inevitabilmente presente tra i due solidi.

## 3.7 Il calorimetro

I confronti tra *Refractance Window*<sup>®</sup> e le sue modifiche, o alternative come la piastra metallica, sono inizialmente basati sullo studio delle cinetiche di essiccamento. Tuttavia, essendo scopo di questa tesi lo studio dei fenomeni termici si ritiene importante effettuare dei test mirati a ricavare la quantità di calore che attraversa il film di Mylar<sup>®</sup> nelle diverse opzioni. Il calore che attraversa una superficie non è una grandezza su cui è facile effettuare una misura diretta, è invece opportuno misurare il calore assorbito o ceduto dai volumi confinanti. La portata di acqua nei canali del RW è tale da garantire una differenza di temperatura tra entrata e uscita non superiore al

## Materiali e metodi

---

paio di gradi, inoltre il sistema è di dimensioni molto maggiori del volume di controllo quindi parte della potenza termica è persa verso l'ambiente. Risulta quindi più conveniente studiare il calore assorbito dal succo che non quello ceduto dall'acqua di servizio del RW. Tuttavia, per esperimenti di termologia, risulta scomodo lavorare con un materiale non omogeneo nè caratterizzato come un succo sottoposto ad essiccamento. Il succo di mango è un materiale disomogeneo che non possiede caratteristiche chimico-fisiche conosciute e affidabili. Si vuole quindi sostituire il succo di mango con dell'acqua distillata, le cui proprietà sono note.

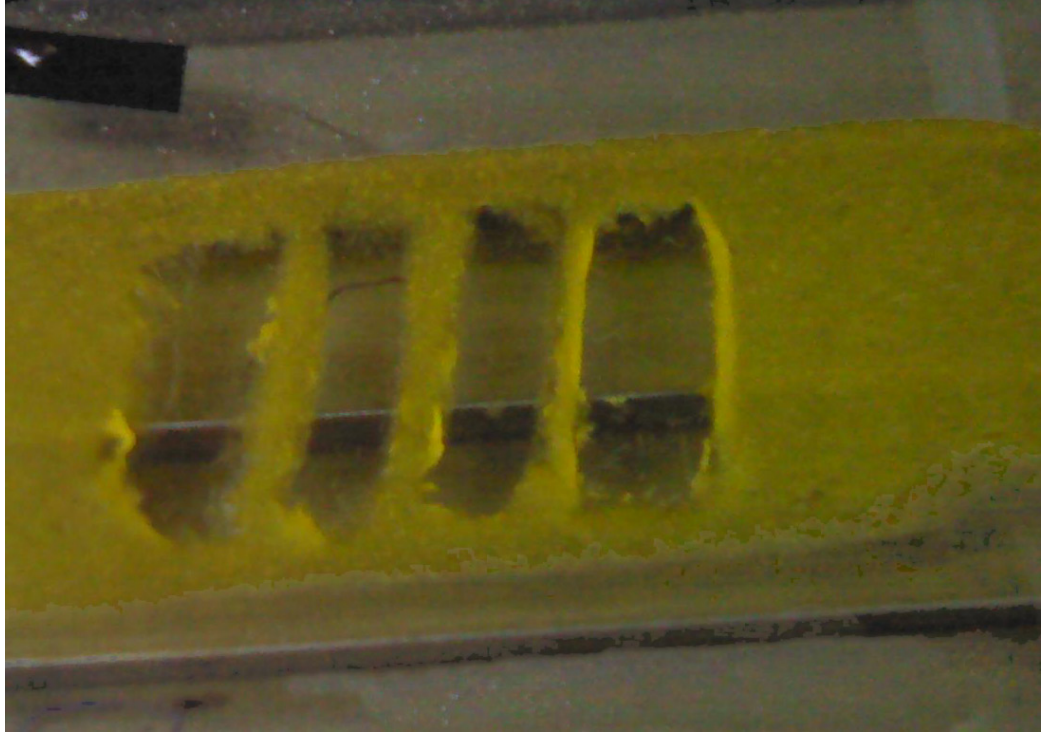
Nel processo di essiccamento il calore assorbito dal prodotto è in parte ceduto all'ambiente esterno e in parte contribuisce all'innalzamento di temperatura e all'evaporazione di una parte di acqua del prodotto. Si cerca quindi di eliminare variabili scomode da misurare come lo scambio termico con l'ambiente e la quantità di acqua evaporata. Si vuole pertanto un sistema chiuso al cui interno vi sia solo acqua e il cui unico scambio termico avvenga con il *Refractance Window*<sup>®</sup>. A questo punto è sufficiente misurare la variazione della temperatura dell'acqua per calcolare il calore assorbito dal sistema.

Si costruisce quindi un modello di calorimetro rappresentato nella sua sezione longitudinale in figura 3.8a e fotografato in figura 3.8b.

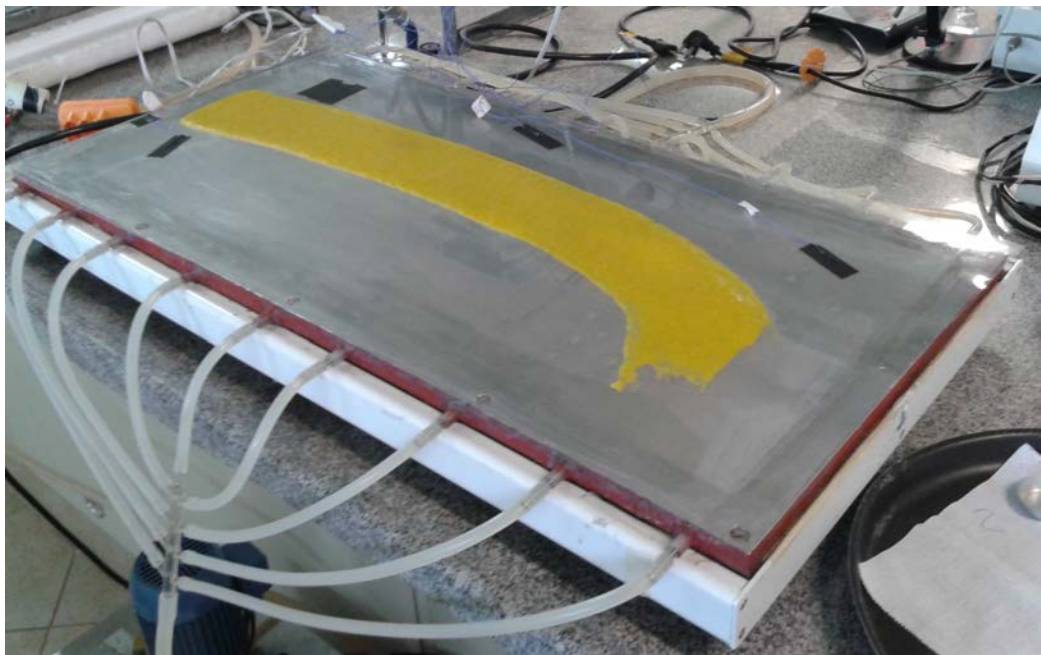
Il volume interno misura  $250\text{ cm}^3$  e durante le misure è riempito totalmente di acqua. Il modello è costruito in polistirolo espanso e consiste nelle pareti laterali e superiore di un volume di controllo aperto verso il *Refractance Window*<sup>®</sup> nella superficie inferiore. Le pareti laterali vengono fatte aderire al film del RW con uno strato di grasso di silicone. Sulla superficie superiore si trova un foro, dal quale si fa entrare l'acqua all'inizio degli esperimenti e che viene poi tappato. Il film di *Mylar*<sup>®</sup> crea quindi la parete mancante a rendere il sistema chiuso, ed è l'unica superficie di scambio termico.

In realtà questo non è vero. Il modello creato non è un calorimetro ideale in quanto le pareti non assicurano un isolamento perfetto; tuttavia il materiale isolante di cui sono costruite garantisce uno scambio termico minimo. Durante l'utilizzo ci si rende conto che ricavare valori precisi e

affidabili del calore trasmesso utilizzando questo calorimetro risulta molto complicato, tuttavia al fine di confrontare diverse alternative, come RW e piastra metallica risulta ancora una buona scelta. Inoltre anche una minima evaporazione è possibile in quanto è lasciato un piccolo foro sulla parete superiore per evitare che si alzi la pressione all'interno e consentire il passaggio dei collegamenti con i sensori di temperatura posti all'interno. Questi sensori sono 3 termocoppie di tipo K collegate ad un sistema di acquisizione dati esterno che registra l'andamento della temperatura interna nel tempo. I sensori sono posizionati ad altezze e coordinate diverse per ottenere un valore medio di temperatura, dato che il sistema per forza di cose non è perfettamente mescolato.

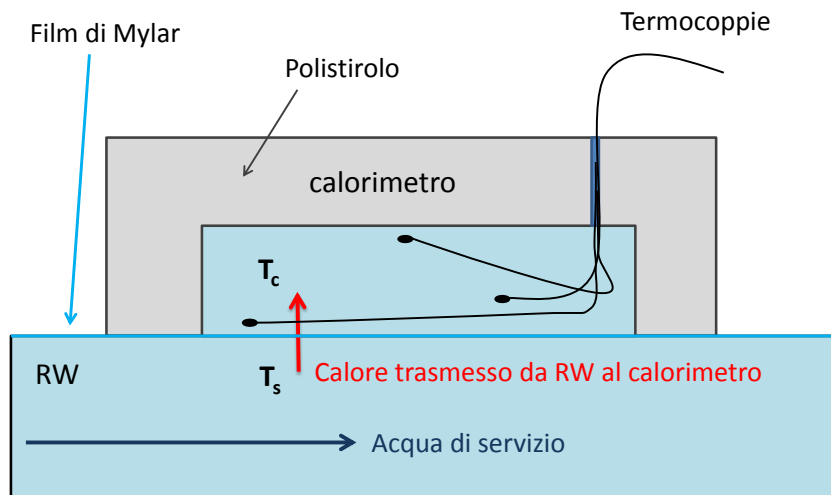


**Figura 3.6:** Strato di mango in fase di essiccazione su rw

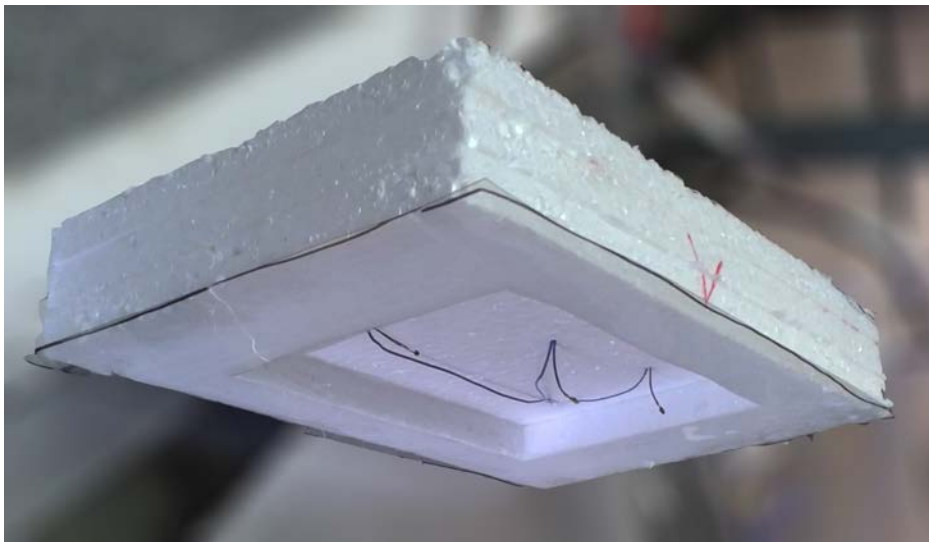


**Figura 3.7:** Piastra metallica con strato di mango ad inizio essiccazione





(a) sezione.



(b) fotografia.

**Figura 3.8:** Calorimetro utilizzato per i test termici



# Capitolo 4

## Risultati e discussione

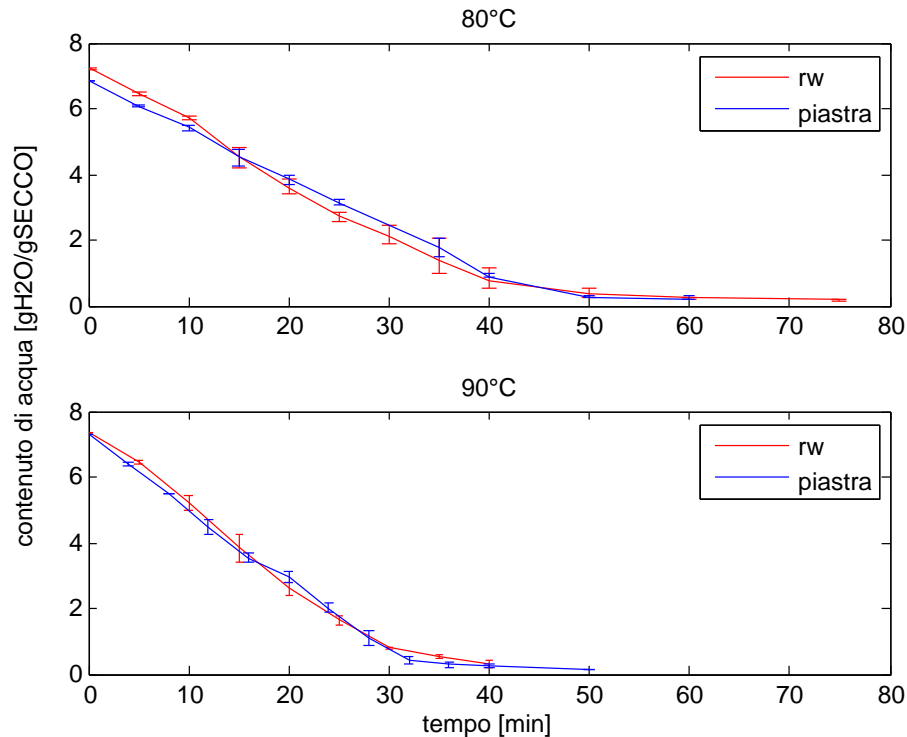
*Refractance Window*<sup>®</sup> è una tecnologia che sembra promettere ottimi risultati con consumi energetici contenuti. Molti studi sono stati effettuati (Abonyi, 2002; Clarke, 2004; Nindo and Tang, 2007), ma manca un'analisi approfondita del trasferimento termico. Si cerca quindi di calcolare e verificare se effettivamente lo scambio termico è governato dall'irraggiamento e quanto siano importanti conduzione e convezione. Le verifiche sono basate principalmente sul confronto con alternative analoghe al RW create ad hoc o con modifiche al RW stesso con l'intento di discriminare l'irraggiamento dalla conduzione.

### 4.1 Confronto tra RW e piastra metallica

Si eseguono test di essiccamento del succo di mango su RW e su piastra metallica. In entrambi i casi la superficie superiore è formata da un film di *Mylar*<sup>®</sup>: nel RW il film è a contatto diretto con l'acqua mentre nel caso della piastra è steso sul metallo. In figura 4.1 sono rappresentate le curve di essiccamento ottenute nei test. Per una migliore visualizzazione dei dati sono riportati i valori di una singola prova degli esperimenti, nella quale sono comunque prelevati 3 campioni in ogni istante. Lungo la curva i trattini indicano il momento del campionamento e la loro ampiezza rappresenta la deviazione dei 3 dati ottenuti ad ogni intervallo. Come si

## Risultati e discussione

---



**Figura 4.1:** Cinetiche di essiccamento di mango su RW e su piastra metallica a 80°C e 90°C

può vedere non si notano particolari differenze tra i due casi per entrambe le condizioni. Risulta invece evidente che all'aumentare di temperatura il tenore di umidità diminuisce più rapidamente: mentre a 80°C il rapporto acqua/secco raggiunge la parità verso i 40 minuti, a 90°C si raggiunge lo stesso valore prima dei 30 minuti. A differenza delle aspettative iniziali, i risultati evidenziano che il calore trasmesso con le due diverse tecniche sia molto simile. Si possono formulare più ipotesi. O la parte di calore che nel RW è trasmessa per irraggiamento viene compensata da qualche altro fenomeno nella piastra metallica come ad esempio una maggiore turbolenza dell'acqua che aumenta la convezione. Oppure il trasferimento termico per via conduttiva/convettiva è molto simile e l'energia trasmessa per irraggiamento nel RW è minima.

La conducibilità dell'alluminio è molto elevata (a 400K la conducibilità

#### 4.1 Confronto tra RW e piastra metallica

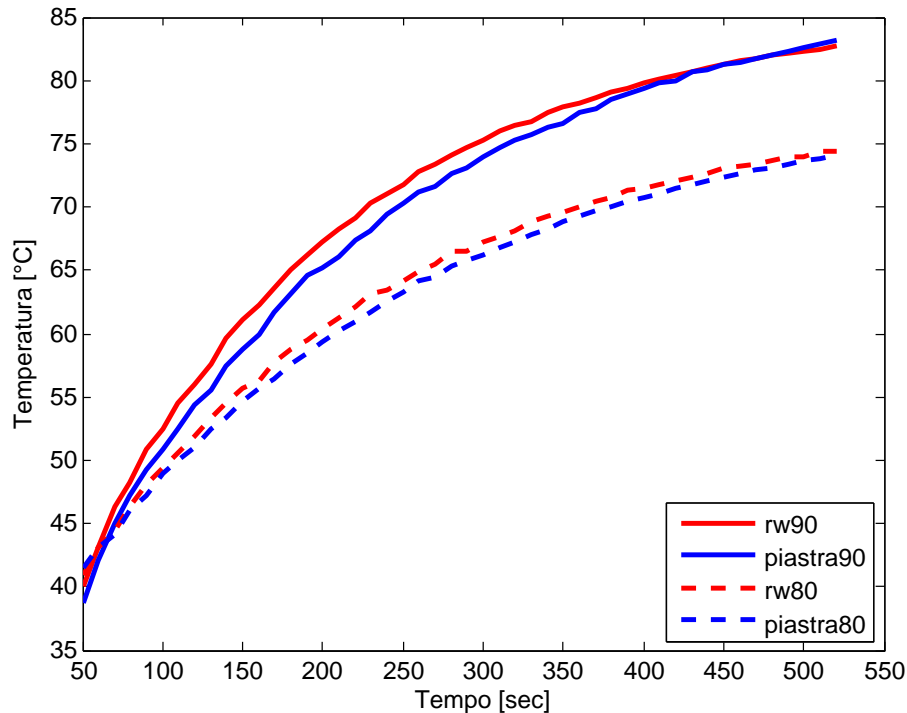
---

dell'alluminio è 240 W/mK (Perry and Green, 2008)). Questo garantisce un ottimo trasferimento termico all'interno della piastra, tuttavia sopra di essa è presente il foglio di *Mylar*<sup>®</sup> che forma una resistenza di contatto dovuta all'interfaccia solido-solido. Di conseguenza bisogna supporre che la temperatura superficiale della piastra sia maggiore della temperatura dell'acqua a contatto con il *Mylar*<sup>®</sup> nel RW. Tanto maggiore quanto più importante è l'irraggiamento nel RW. Ciò può essere dovuto ad un moto fluidodinamico all'interno dei canali più spinto che nel RW, il quale crea strati limite inferiori nel contatto acqua-alluminio piuttosto che nel contatto acqua-*Mylar*<sup>®</sup> e quindi maggiori temperature interfacciali. Oppure, per la seconda ipotesi, l'irraggiamento nel RW è minimo e forse anche la resistenza di contatto non è poi così rilevante.

Per comprendere meglio se il calore trasmesso nelle due diverse opzioni sia in effetti di quantità paragonabile si procede eseguendo test con il calorimetro. Si portano a regime i due sistemi (RW e piastra metallica) e si riempie di acqua fredda il calorimetro aderito al film prima di una e poi dell'altra apparecchiatura. La temperatura dell'acqua del calorimetro inizia a salire, variando da una  $T$  iniziale di 20°C ad una  $T$  finale prossima alla temperatura dell'acqua di servizio. I valori misurati negli esperimenti sono riportati nei grafici di figura 4.2, relativi ai test con l'acqua di servizio mantenuta rispettivamente a 80 °C e 90 °C. Tuttavia il grafico, riportato al fine di mostrare l'andamento del processo, non è nella forma tale da rendere immediato il paragone del trasferimento termico tra RW e piastra metallica. Per confrontare le curve è più opportuno analizzare la pendenza delle stesse, quindi la variazione di temperatura nell'intervallo di tempo. Inoltre una variabile di riferimento sensata su cui costruire le curve non deve essere il tempo (variabile indipendente) ma potrebbe essere la forza motrice che determina il trasferimento termico, quindi il  $\Delta T$ , ossia la differenza tra le temperature dell'acqua di servizio e dell'acqua nel calorimetro ( $T_s$  e  $T_c$  di figura 3.8), se si vuole individuare una legge di trasferimento termico per conduzione, oppure la differenza della quarta potenza delle temperature ( $T_s^4 - T_c^4$ ), se si vuole verificare uno scambio termico per irraggiamento. In questo modo se una delle due modalità di trasferimento

## Risultati e discussione

---



**Figura 4.2:** Andamento della temperatura negli esperimenti con calorimetro su RW e su piastra di alluminio

termico è dominante si dovrebbe notare un andamento lineare nel grafico relativo.

Il calcolo della pendenza di una curva, quindi la sua derivata, va evitata su dati sperimentali, in quanto piccoli errori di misura possono produrre errori molto grandi nella derivata. Prima di derivare è buona norma trovare un fitting dei dati opportuno. In inglese si parla di *Curve fitting* per indicare la forma matematica di una curva che approssimi o interpoli i dati sperimentali. Si sceglie quindi di utilizzare un polinomio di 5° grado per l'approssimazione delle curve e si procede al calcolo della derivata.

Il calore assorbito dall'acqua nel calorimetro si ricava dalla variazione della temperatura nel tempo secondo la formula:

$$Q = \frac{dT}{dt} \cdot m_{H_2O} \cdot Cp_{H_2O} \quad [W] \quad (4.1)$$

## 4.1 Confronto tra RW e piastra metallica

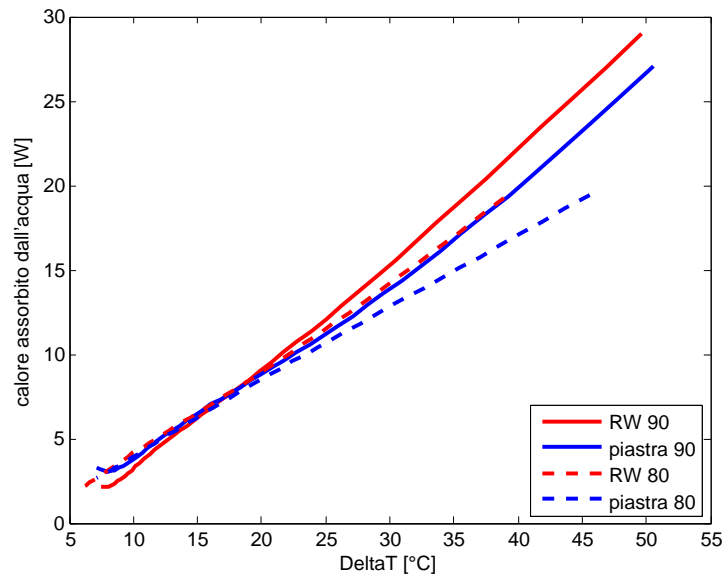
---

dove  $dT/dt$  è la variazione di temperatura nel tempo,  $m_{H_2O}$  è la massa di acqua e  $Cp_{H_2O}$  è il calore specifico dell'acqua. Si parla di calore assorbito intendendo il valore al netto delle perdite verso l'ambiente esterno, in quanto il valore deriva direttamente dalla variazione di temperatura dell'acqua, e non dagli scambi termici. Nella realtà il calore assorbito è maggiore, e parte di esso è perso verso l'ambiente, soprattutto ai  $\Delta T$  minori, ossia nella parte finale dei test. Tuttavia, essendo la coordinata del grafico proprio il  $\Delta T$  (o  $T_s^4 - T_c^4$ ), in ogni valore di ascissa le perdite dovrebbero essere uguali, quindi il confronto è ritenuto più che accettabile. Il calore  $Q$  assorbito dal calorimetro è riportato in figura 4.3. Si nota che nella prima immagine le curve si avvicinano alla linearità molto più che nella seconda, da questo si può dedurre che la conduzione è dominante rispetto all'irraggiamento. Si ricorda che il  $\Delta T$  è quello fra acqua di servizio e acqua nel calorimetro, quindi il processo inizia con  $\Delta T$  grandi per andare via via diminuendo; inoltre la temperatura dell'acqua alla parete sarà di qualche grado inferiore a quella media, per questo il valore nullo del calore trasmesso sembra (immaginando di continuare le curve) che si verifichi per un  $\Delta T > 0$

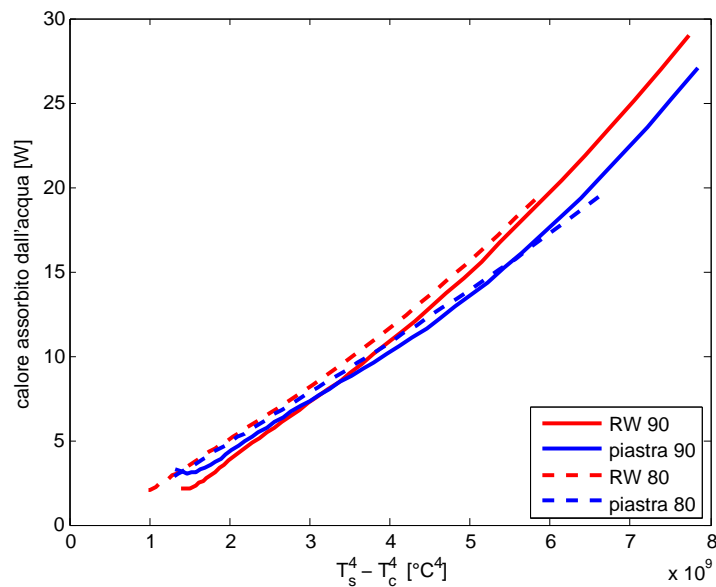
Appare evidente una sensibile differenza nel calore trasmesso nel RW e nella piastra, in particolare risulta maggiore negli esperimenti condotti con RW. Questa tendenza è accentuata con valori  $\Delta T$  maggiori, cioè quando la temperatura all'interno del calorimetro è più bassa, mentre le differenze vanno ad annullarsi per valori di  $\Delta T$  prossimi ai 18°C negli esperimenti condotti a 90°C e a 7°C per quelli condotti a 80°C. Per valori di  $\Delta T$  ancora minori la tendenza è opposta, come se la piastra metallica migliorasse il trasferimento termico ad alte temperature rispetto al RW.

La piastra metallica è inizialmente pensata come tecnica analoga al *Refractance Window*® in cui la parte radiante di energia termica sarebbe omessa in quanto la superficie metallica non è un buon emettitore. Tuttavia nel corso dello studio ci si rende conto che le differenze costruttive portano ad avere due fenomeni di trasferimento termico differenti, non solo per l'irraggiamento, ma anche per la convezione forzata interna, la resistenza di contatto e un isolamento, se pur minimo, da parte dell'alluminio. Si pensa quindi ad un'alternativa più affidabile per effettuare test termici

## Risultati e discussione



(a) riferimento alla differenza di T.



(b) riferimento alla differenze tra le quarte potenze di T.

**Figura 4.3:** Calore assorbito dall'acqua nel calorimetro su RW e su piastra metallica.



in cui si riesca a riprodurre fedelmente il trasferimento termico del RW, isolandone la sola parte radiante. L'idea è quella di apportare una modifica al RW stesso depositando un film metallico sulla superficie inferiore del Mylar® con l'intento di riflettere la radiazione verso l'acqua di servizio. Si crea così un *Refractance Window*® schermato.

## 4.2 Confronto tra RW e RW schermato

Il deposito metallico sul Mylar® è certamente una buona idea, ma nelle condizioni dello studio risulta irrealizzabile. Non si trova un'azienda specializzata nel settore reperibile dall'università in tempi ragionevoli, quindi si valuta un'alternativa più semplice, rapida ed economica. Si pensa di ottenere risultati analoghi al deposito metallico incollando un sottile film metallico al Mylar®. Si usa un film di alluminio da cucina di uso comune e lo si incolla con del silicone. Per valutare eventuali ulteriori differenze, si creano 3 aree di test differenti: un'area con l'alluminio posto sotto al film, a contatto con l'acqua di servizio, un'area con l'alluminio sopra, a contatto con l'eventuale prodotto o, in alcuni esperimenti, con il calorimetro e una terza area è lasciata senza alluminio. Il *Refractance Window*® modificato è mostrato in figura 4.4.

Mentre la conducibilità dell'alluminio è molto elevata, al punto da poter trascurare la sua presenza dal punto di vista conduttivo, il silicone ha una conducibilità paragonabile a quella del Mylar®, per cui viene disteso finemente per minimizzare quanto più possibile lo spessore. Dalle misure effettuate con micrometro risultano, in media, uno spessore di 0.007 mm di silicone e 0.02 mm di alluminio su un Mylar® di 0.249 mm,. La resistenza termica  $R$  è definita come il rapporto tra lo spessore  $s$  dello strato considerato e la sua conducibilità termica  $\lambda$ :  $R = s/\lambda$  [K/W], quindi è riferita solo alla conduzione. Per i 3 materiali appena visti si trovano quindi 3

## Risultati e discussione

---



**Figura 4.4:** Il Refractance Window con il Mylar schermato con l'alluminio (l'alluminio è incollato sopra al Mylar a sinistra e sotto al Mylar a destra)

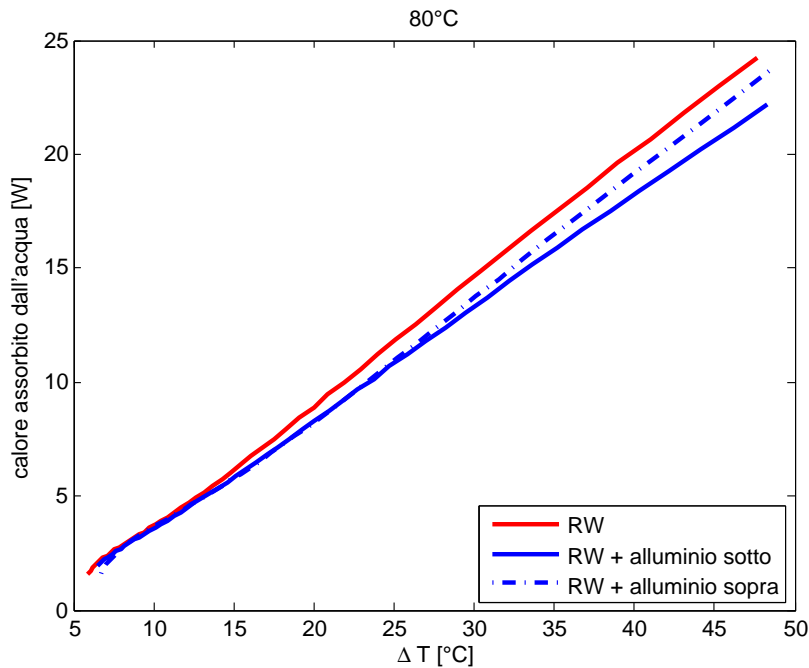
resistenze in serie di valore:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.249 * 10^{-3} / 0.16 = 1.556 * 10^{-3} \quad [K/W] && \text{per il Mylar}^{\text{®}} \\ R_2 &= 0.007 * 10^{-3} / 0.2 = 3.5 * 10^{-5} \quad [K/W] && \text{per il silicone} \quad (4.2) \\ R_3 &= 0.02 * 10^{-3} / 240 = 8.3 * 10^{-8} \quad [K/W] && \text{per l'alluminio.} \end{aligned}$$

La resistenza totale è  $R = R_1 + R_2 + R_3 \approx R_1$ , in quanto  $R_2$  e  $R_3$  risultano di alcuni ordini di grandezza inferiori, e quindi trascurabili. La conduzione del film non risulta particolarmente alterata, mentre l'irraggiamento è interrotto dal film di alluminio. In questo modo si possono condurre esperimenti in cui le condizioni fluidodinamiche sono molto vicine a quelle del RW, mentre lo scambio termico è caratterizzato dalla riflessione della parte radiante.

Si procede effettuando una serie di test con calorimetro sulle 3 aree del RW. I test precedentemente condotti con temperature dell'acqua di 90°C

## 4.2 Confronto tra RW e RW schermato



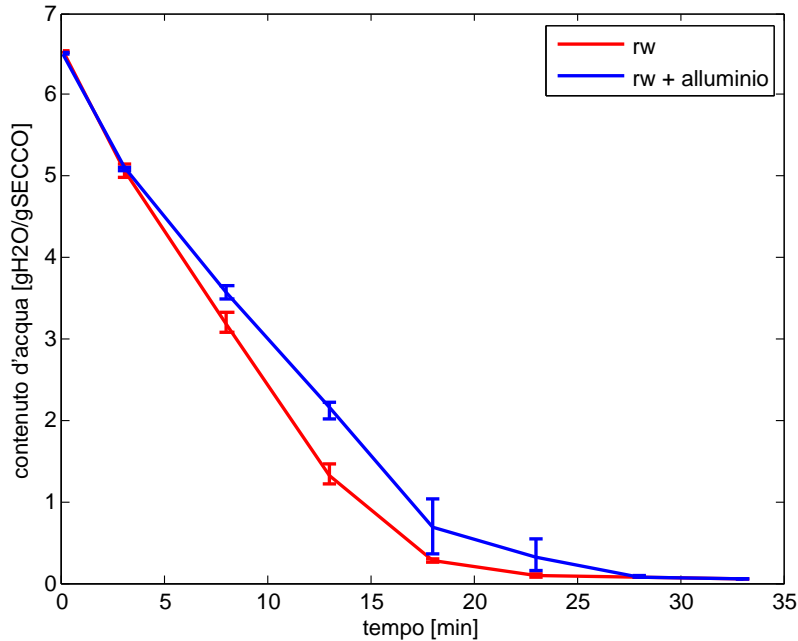
**Figura 4.5:** Calore assorbito dall'acqua nel calorimetro su RW standard e con schermatura

hanno leggermente deformato la base del calorimetro, probabilmente per il fatto di essere troppo vicino alla temperatura di transizione vetrosa del polistirene. Si costruisce quindi un nuovo calorimetro e si sceglie, da questo momento, di procedere con temperatura dell'acqua di servizio di 80°C. Si effettuano ciclicamente 3 test per ognuna delle 3 zone, e si mediano i risultati di ognuna. In figura 4.5 sono riportati i risultati dei test, sempre nella forma di calore  $Q$  assorbito dall'acqua in funzione del  $\Delta T$ .

Si può notare che il RW standard trasmette una quantità sensibilmente maggiore di calore rispetto a quello schermato e che, come nei test precedenti, a bassi  $\Delta T$  i valori si avvicinano. Avendo ritenuto le resistenze termiche dell'alluminio e della colla trascurabili verrebbe da confermare che esiste una componente di trasferimento termico in forma di irraggiamento. Tuttavia si nota che a lungo andare tra il film plastico e l'alluminio si formano delle piccole intercapedini in cui fluisce dell'acqua e spesso vi rimangono intrappolate alcune bolle di vapore. Il fenomeno, anche se

## Risultati e discussione

---



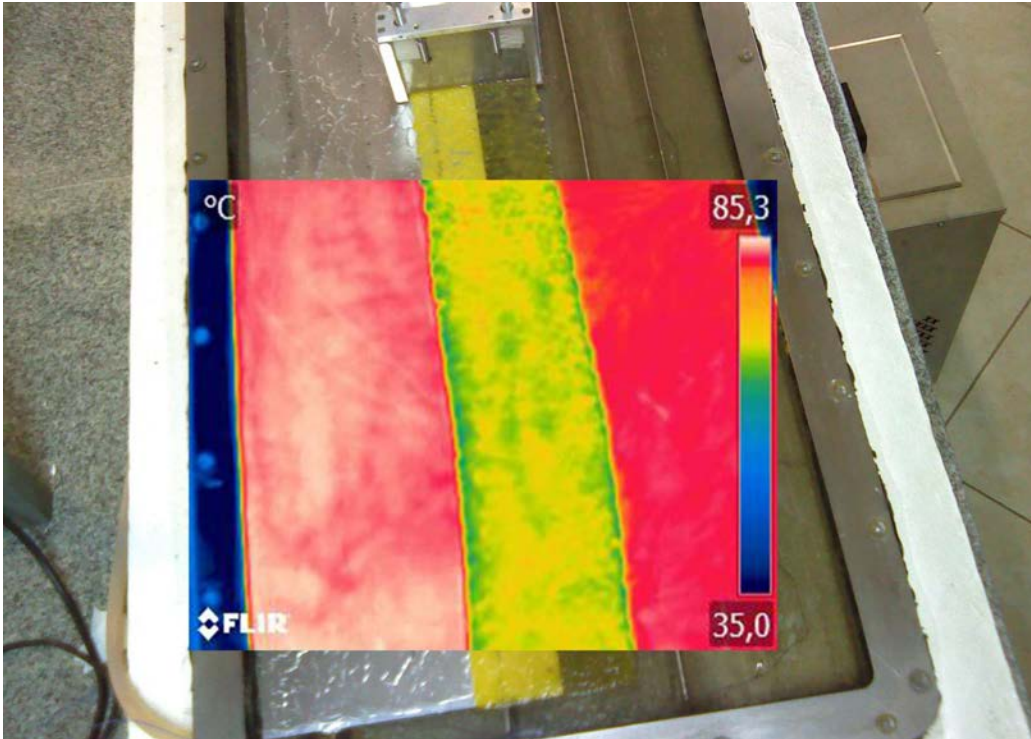
**Figura 4.6:** Cinetiche di essiccamento di mango su RW e RW schermato a 80°C

di piccole dimensioni, potrebbe spiegare un calo nell'efficienza del trasferimento termico, nell'eventualità che non sia dovuto totalmente ad una componente di irraggiamento.

Anche in questa configurazione si svolgono test di essiccamento del succo di mango. Si distende uno strato di succo dello spessore di 2 mm sul RW in condizioni standard e ugualmente sul RW con l'alluminio incollato nella parete interna del film plastico. Come di consueto si analizza il contenuto di acqua nel tempo, in 3 esperimenti diversi, mediati. I risultati sono riportati in figura 4.6. Anche in questo caso, come ci si poteva aspettare, le differenze nei tempi di essiccamento non sono marcate.

### 4.3 Termografie

Con lo scopo di ricavare valori di temperatura utili nei calcoli, si catturano alcune termografie del succo di mango in fase di essiccamento.

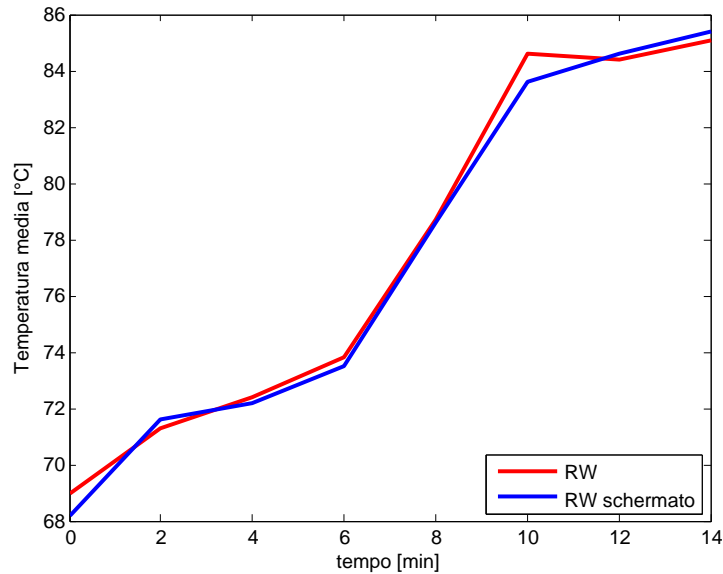


**Figura 4.7:** Fotografia con termografia sovrapposta di essiccamento su RW e RW schermato

Il succo viene distribuito in modo da coprire sia la parte schermata che quella normale del RW, in modo da vedere su ogni singola termografia eventuali differenze nella temperatura media tra le due zone, come mostrato in figura 4.7. Durante l'essiccamento si acquisisce una termografia ogni periodo  $t$ , solitamente di 2 minuti, per studiare l'andamento delle temperature nel tempo. Per ogni immagine catturata si individuano due aree: una del succo che sta evaporando sopra al RW classico, e una sopra al RW schermato facendo attenzione ad escludere eventuali zone eccessivamente disomogenee come quelle vicino ai bordi o eventuali errori nella spalmatura. Sulle due aree si calcola la temperatura media, il cui andamento di uno degli essiccamenti è riportato in figura 4.8. Le curve ottenute mostrano sbalzi piuttosto strani della temperatura, probabilmente dovute alla scarsa uniformità dello strato di succo, come visibile in appendice B. Sulle varie termografie eseguite, con spessori di succo e temperature

## Risultati e discussione

---



**Figura 4.8:** Andamento delle temperature medie della superficie del succo su RW e RW schermato

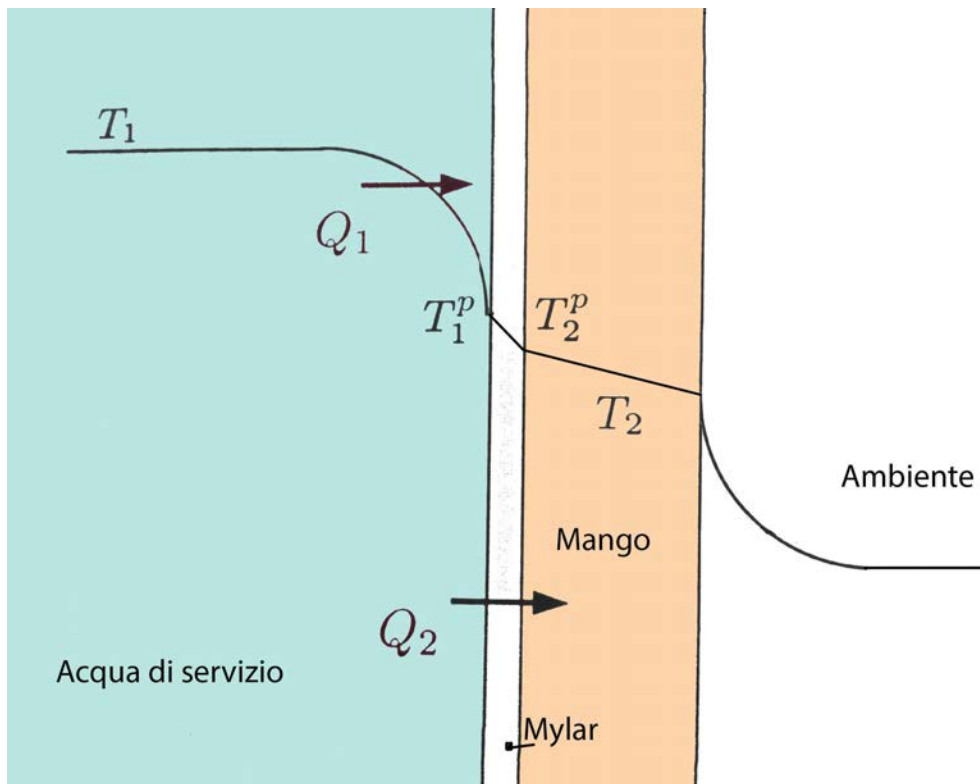
dell'acqua differenti, non si notano particolari differenze di temperatura tra la zona schermata e quella non. Capita di trovare temperature medie leggermente superiori sul RW classico, come viceversa, probabilmente a causa delle piccole variazioni locali dello spessore dovute alla procedura di stesura e alla eventuale disomogeneità del succo.

In appendice B è riportato l'esempio di una sequenza di termografie relative all'essiccamento di uno strato di 2 mm di succo di mango.

### 4.4 Valutazioni teoriche del calore trasmesso

Nel *Refractance Window*<sup>®</sup> il calore passa dall'acqua di servizio al prodotto da essiccare (mango) attraversando il film di *Mylar*<sup>®</sup> sfruttando tutte e tre le vie di trasferimento termico: convezione, conduzione e irraggiamento. Il profilo termico è rappresentato, in modo qualitativo, nella sezione di RW di figura 4.9, dove si considera che  $T_1$  è la temperatura dell'acqua di servizio a grande distanza dalla superficie interna del film plastico,  $T_{1p}$  e

#### 4.4 Valutazioni teoriche del calore trasmesso



**Figura 4.9:** Profilo di temperatura in una sezione ruotata del RW

$T_{2p}$  sono le temperature delle due interfacce del film a contatto con l'acqua di servizio e con lo strato di mango;  $T_2$  è la temperatura media dello strato di mango. Con una freccia sono rappresentati i flussi di calore dall'acqua di servizio alla parete interna del film plastico ( $Q_1$ ), e quello che attraversa il film plastico e che, quindi, è trasmesso al prodotto da essiccare ( $Q_2$ ).

La distribuzione delle temperature all'interno dello strato di mango risulta piuttosto difficile da stimare, in quanto il processo non è stazionario e le proprietà fisiche del succo non sono note. Ad ogni modo, al fine di comparare le diverse vie di trasporto termico, si esclude dallo studio il profilo termico dello strato di mango, per concentrarsi sul flusso di calore attraverso il film plastico. Dalle termografie effettuate si nota che il mango, spalmato a temperatura ambiente su RW a  $90^\circ\text{C}$ , si porta in breve tempo a temperature superficiali intorno a  $70^\circ\text{C}$ , per arrivare a quasi  $90^\circ\text{C}$  alla fine del processo. Nella fase finale l'evaporazione cala sensibilmente per via

## Risultati e discussione

---

del basso contenuto d'acqua residuo, comportando l'aumento della temperatura. Si può dedurre che la temperatura alla parete  $T_{2p}$  sarà compresa per la quasi totalità del processo tra 70 °C e 90°C, si assume quindi, per i calcoli, costante nel tempo e pari a 80°C. Il processo a questo punto è stazionario e il calore ceduto dall'acqua di servizio è uguale a quello che attraversa il film plastico, ossia  $Q_1 = Q_2$ . Le due portate termiche sono quasi uguali anche nella realtà (processo non stazionario) in quanto l'inerzia termica del film di Mylar® è trascurabile quindi, anche se vi fossero piccole variazioni di temperatura nel tempo, il calore assorbito o ceduto dal Mylar® non sarebbe rilevante.

Lasciando per ora da parte l'irraggiamento, che dagli esperimenti sembra essere trascurabile, il trasferimento di calore avviene per convezione dalla massa dell'acqua di servizio nell'ambiente interno verso la superficie interna del film plastico e conduzione attraverso il film. In pratica si considera che:

- la temperatura dell'acqua di servizio è uniforme, con eccezione di uno strato adiacente al film plastico dove è localizzato il gradiente di temperatura;
- nel film plastico la temperatura varia con continuità dal valore di  $T_{1p}$  a  $T_{2p}$ ;
- le superfici di separazione tra il film e i due fluidi (acqua all'interno e succo all'esterno) sono in equilibrio termico; in altri termini in corrispondenza delle interfacce esiste un unico valore di temperatura e il profilo non presenta discontinuità in corrispondenza delle superfici di separazione.

Le portate termiche sono quindi:

$$Q_1 = h_1 A (T_1 - T_{1p}) \quad (4.3)$$

$$Q_2 = \frac{k_m A}{s} (T_{1p} - T_{2p}) \quad (4.4)$$



#### 4.4 Valutazioni teoriche del calore trasmesso

---

dove  $h_1$  è il coefficiente di scambio termico convettivo,  $A$  è la superficie di scambio,  $k_m$  è la conducibilità termica del Mylar<sup>®</sup> e  $s$  lo spessore del film. Le (4.3) e (4.4) sono formalmente analoghe alla legge di Ohm ( $V = \cdot RI$ ) se viste come  $\Delta T = R * Q$  dove la resistenza  $R$  vale  $1/h_1 A$  nel primo caso e  $s/k_m A$  nel secondo. Esplicitando rispetto alle differenze di temperatura si ha

$$T_1 - T_{1p} = Q_1 \frac{1}{h_1 A} \quad (4.5)$$

$$T_{1p} - T_{2p} = Q_2 \frac{s}{k_m A} \quad (4.6)$$

e sommando le due espressioni considerando che  $Q_1 = Q_2 = Q$  si ha

$$T_1 - T_{2p} = Q \left( \frac{1}{h_1 A} + \frac{s}{k_m A} \right). \quad (4.7)$$

È ora sufficiente determinare le resistenze termiche per ricavare la portata di calore e la temperatura intermedia  $T_{1p}$ . Il coefficiente di scambio termico  $h_1$  è definito come

$$h_1 = \frac{k_{H_2O}}{x} Nu \quad (4.8)$$

dove  $x$  è lunghezza del canale e  $Nu$  è il numero di Nusselt, gruppo adimensionale che esprime il rapporto tra il flusso di calore scambiato per convezione e il flusso di calore scambiato per conduzione. Per trasporto termico tra superfici piane il valore medio di  $Nu$  è definito come (Perry and Green, 2008)

$$\overline{Nu} = \frac{1.128 Pr^{1/2} Re^{1/2}}{(1 + (0.0468/Pr)^{2/3})^{1/4}} \quad (4.9)$$

dove compaiono due numeri adimensionali ( $Re$  e  $Pr$ ) che descrivono le condizioni del moto e proprietà fisiche del fluido interessato. Si calcola quindi il numero di Reynolds, definito come il rapporto tra forze di inerzia e forze di attrito:

$$Re = \frac{\rho v D_e}{\mu} = 3068 \quad (4.10)$$

dove  $\rho$  e  $\mu$  sono rispettivamente la densità e la viscosità dinamica dell'acqua a 360 K ( $\approx 90^\circ\text{C}$ ) (Perry and Green, 2008) e  $v$  è la velocità media del fluido

## Risultati e discussione

---

calcolata come portata volumetrica/sezione del canale. I valori di tutte le grandezze usate nei calcoli di questo capitolo sono riportati in appendice A. Rimane da individuare il numero di Prandtl, che è dato dal rapporto tra diffusività di quantità di moto (o viscosità cinematica) e diffusività termica:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_{H_2O}} = 2.12 \quad (4.11)$$

in cui  $c_p$  è il calore specifico dell'acqua.

Si può quindi calcolare il numero di Nusselt, da cui il coefficiente di scambio termico  $h_1$ :

$$h_1 = \frac{k_{H_2O}}{x} Nu = 67.04 \quad [W/m^2K] \quad (4.12)$$

Il flusso termico trasmesso tra l'acqua di servizio e il prodotto da essiccare è ottenuto dividendo la portata termica  $Q$  ricavata dalla (4.7) per la superficie  $A$ :

$$q = \frac{T_1 - T_{2p}}{\frac{1}{h_1} + \frac{s_m}{k_m}} = 590.74 \quad [W/m^2]. \quad (4.13)$$

Dalle (4.5) e (4.7) si ottiene la temperatura di parete  $T_{1p}$ :

$$T_{1p} = T_1 - \frac{\left(\frac{1}{h_1} + \frac{s}{k_m}\right)^{-1}}{h_1} * (T_1 - T_{2p}) = 81.2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.14)$$

Si procede quindi al calcolo della componente radiante del calore assumendo in prima istanza il film in *Mylar*<sup>®</sup> totalmente trasparente. Per trasparente si intende un materiale che può essere attraversato in tutto il suo spessore dalle radiazioni luminose senza modificarle.

L'irraggiamento è un fenomeno che interessa le superfici dei materiali, quindi si calcola il flusso termico radiativo utilizzando come riferimento le temperature superficiali dell'acqua di servizio ( $T_{1p}$ ) e del succo in superficie ( $T_{2p}$ ). La radiazione scambiata tra due superfici separate dal vuoto è data da (Çengel et al., 2013)

$$g = \frac{\sigma(T_{1p}^4 - T_{2p}^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4.15)$$

#### 4.4 Valutazioni teoriche del calore trasmesso

---

dove  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  sono le emissività di acqua e succo (assunte uguali) e  $\sigma$ , come visto nella (2.3), è la costante di Stefan-Boltzmann. Con le temperature di parete dei calcoli precedenti e i valori di emissività dell'acqua si ottiene quindi  $g = 10.99 \text{ [W/m}^2\text{]}$ .

Appare evidente che il calore trasmesso per radiazione è nettamente inferiore a quello trasmesso per conduzione, con un rapporto di 1/54. Essendo la temperatura di parete  $T_2^p = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  impostata arbitrariamente, si sono eseguiti i conti precedenti per ogni valore compreso tra i  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  e i  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , range nel quale sicuramente è compresa la temperatura di parete in qualsiasi momento del processo. I risultati ottenuti mostrano sempre un rapporto tra il calore per irraggiamento e quello per conduzione inferiore ad 1/20. In queste condizioni si ritiene inutile studiare la trasparenza del Mylar<sup>®</sup>, la cui determinazione risulta ardua e porterebbe ad una riduzione ulteriore della radiazione trasmessa, in quanto si può già affermare che la componente di irraggiamento sul calore totale è minima.

Anche la temperatura alla parete interna  $T_{1p}$  andrebbe rivista in quanto il calcolo per ottenerla non tiene conto del contributo radiativo, il quale è tuttavia minimo, quindi si ritiene ammissibile mantenere il valore precedente di  $T_{1p}$  valido.

Va inoltre tenuto conto del fatto che secondo il brevetto l'acqua di servizio dovrebbe trovarsi a poco meno di  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , mentre le condizioni di moto della stessa non sono riportate. Si ripetono quindi i calcoli con la temperatura dell'acqua di  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  e variando le condizioni del moto del fluido. La temperatura maggiore aumenta l'irraggiamento, che diviene pari a  $11.95 \text{ [W/m}^2\text{]}$ , ma non la conduzione (a parità di  $\Delta T$  tra le pareti): il rapporto risulta di 1/49 contro 1/54 di prima. Anche le condizioni di moto del fluido non sono così rilevanti per quanto riguarda il rapporto tra i due calori. Esse determinano la quantità di calore scambiata per convezione e quindi tra il bulk dell'acqua di servizio e la sua interfaccia con il film plastico, ma non modificano lo scambio attraverso il Mylar<sup>®</sup> che è definito solo dalle temperature superficiali.

### 4.5 Discussione sul Refractance Window

*MCD Technologies Inc.* è l'azienda fondata dall'inventore di *Refractance Window*<sup>®</sup> per la produzione e il commercio del relativo brevetto. Nell'opuscolo promozionale dell'azienda, riportato in parte nell'appendice C, si trovano le seguenti dichiarazioni, riportate in lingua originale, rispetto al *Refractance Window*<sup>®</sup>:

1. This new technology uses water to transmit energy at the speed of light directly into the product to be dried.
2. The patented principle of operation allows infrared energy in the circulating water beneath the belt to pass directly into the moist product.
3. The process is self-limiting due to the nature of Refractance. As the product dries, the Window allowing the rapid transfer of infrared energy closes. Heat, conducted through the belt, evaporates the remaining moisture.
4. Water is one of the most effective heat transfer media in nature because all three heat transfer methods function within it. However, unlike some other materials, water does not transmit infrared energy by radiation to its surroundings.
5. Therefore, if the surface of water is covered by a transparent medium, such as plastic, only conduction may take place (. . .), if a moisture-laden material (in this case, the material to be dried) is put in direct contact with the plastic surface, there is a window to the passage of infrared energy. . .
6. As the material dries, however, the infrared window closes, as little moisture remains to contact the plastic and the only heat transfer then taking place is by means of conduction. Since plastic is a very poor conductor, little heat is lost in this manner.

## 4.5 Discussione sul Refractance Window

---

7. The MCD Dryer utilizes the refractive principle of the water's surface; the principle is harnessed by creating a window to the passage of infrared in order to dry material that is placed on a transparent film floating on the surface of the water.

L'azienda insiste nel promuovere la tecnologia *Refractance Window*<sup>®</sup> come basata fundamentalmente sul trasferimento termico per radiazione. Il fascicolo inizia affermando che la tecnologia trasmette calore alla velocità della luce (punto 1), per proseguire dichiarando che il principio del brevetto è quello di permettere all'energia termica dell'acqua circolante di passare direttamente al prodotto umido tramite infrarossi (punto 2). Inoltre il punto forte del RW sembra essere il fatto di essere autolimitante, in quanto il passaggio di radiazione avviene solo mentre il prodotto è umido; quando il prodotto si asciuga la "finestra" si chiude e il calore può attraversare il film plastico per sola conduzione, che sarà molto bassa per le proprietà isolanti della plastica (punto 3).

Sulla base dei diversi test eseguiti e dei calcoli effettuati, sembra invece evidente che il contributo termico della radiazione infrarossa non è significativo. Le termografie mostrano temperature superficiali praticamente uguali negli essiccamenti con irraggiamento e in quelli schermati e i calcoli dimostrano che il calore trasferito per conduzione è almeno 50 volte superiore a quello trasferito per radiazione. Gli esperimenti con il calorimetro su RW schermato sono gli unici in cui si notano differenze che, se pur non enormi, non sono trascurabili, ma potrebbero essere dovute anche all'aumento della resistenza termica conduttiva causato dalle piccole bolle di vapore che spesso si notano. Anche se la differenza visibile in questi test fosse totalmente attribuibile alla radiazione infrarossa, questa non sarebbe comunque di un'entità tale da affermare che l'irraggiamento è alla base del funzionamento della tecnologia.

Inoltre nelle frasi riportate sull'opuscolo si legge anche che l'acqua, a differenza di altri materiali, non trasmette radiazione infrarossa all'ambiente circostante e che, se coperta con un materiale trasparente, trasmette calore con l'ambiente solo per conduzione. Salvo che, se sopra al materiale trasparente si pone un prodotto umido, nel qual caso avviene il passaggio

## Risultati e discussione

---

di infrarossi (punti 4 e 5). Questo non è vero in quanto qualsiasi corpo a temperatura superiore allo zero assoluto emana sempre radiazione verso l'ambiente circostante (Modest, 2013). Dall'equazione di Fresnel (3.1) si può verificare che la radiazione trasferita dal RW ad un prodotto posto sopra è effettivamente maggiore nel caso in cui il prodotto sia una soluzione acquosa, ma ciò non vuol dire che se non lo è la trasmissione non avviene. Inoltre, ripetendo, i valori del calore trasferito per irraggiamento sono in entrambi i casi insignificanti rispetto al calore trasmesso per conduzione, che rimane pertanto l'unico fenomeno rilevante nel trasferire energia termica attraverso il *Mylar*<sup>®</sup>.

## Capitolo 5

### Conclusioni

Lo studio vuole approfondire il funzionamento della tecnologia Refractance Window®: un' apparecchiatura per l'essiccamento di alimenti o altri materiali liquidi o semiliquidi, con formazione di polveri, fiocchi, granuli o film. In particolare si cerca di evidenziare l'importanza del trasferimento termico tramite radiazione infrarossa che, secondo il produttore, è il fenomeno trainante del processo. La tecnologia è infatti promossa per le peculiarità di essere energeticamente efficiente e di non alterare le proprietà qualitative del prodotto da essiccare, proprio grazie al suo principio di "finestra di rifrazione". Il concetto di "finestra di rifrazione" consiste sostanzialmente nell'idea che l'energia termica è trasferita dall'acqua di servizio al prodotto da disidratare tramite irraggiamento solo finché il prodotto è umido, mentre quando il prodotto si secca il trasporto termico si riduce notevolmente in quanto la radiazione viene riflessa (la finestra si chiude). Questo permette di essiccare in breve tempo vari prodotti senza surriscaldarli quando, verso la fine del processo, il contenuto di acqua è basso, evitando così di degradare nutrienti, sapore, colore e aromi. In parallelo all'irraggiamento avviene la conduzione termica, che però, secondo il produttore, è molto piccola per le proprietà isolanti del film in poliestere che separa l'acqua dal prodotto.

Dallo studio effettuato appare però evidente che in tutto il processo il fenomeno dell'irraggiamento è marginale, in quanto la quasi totalità

## Conclusioni

---

dello scambio termico attraverso il film plastico di separazione avviene per conduzione.

Si sono eseguiti test di essiccamento di un succo di mango, test di trasporto termico con un calorimetro artigianale, termografie per il rilevamento delle temperature e calcoli teorici. In particolare si è tentato di isolare l'irraggiamento schermato il film plastico con una pellicola di alluminio, materiale che ha la caratteristica di riflettere gran parte della radiazione infrarossa.

Nel confronto dei risultati ottenuti con la tecnica standard e con quella schermata non si notano particolari differenze nel calore trasmesso al calorimetro. Le termografie mostrano temperature medie delle superfici di succo in fase di essiccamento praticamente uguali nei due casi. Anche la durata del processo di essiccamento non risulta influenzata. Questo va in contrasto con quanto avverrebbe se la trasmissione fosse dominata dall'irraggiamento, come sostenuto dal produttore.

Anche la valutazione teorica dei flussi termici dimostra che l'irraggiamento è trascurabile, in quanto i risultati dei calcoli rivelano che la componente conduttiva è di almeno 50 volte superiore.

La tecnica *Refractance Window*<sup>®</sup> offre comunque una serie di vantaggi, tra cui i bassi costi d'investimento e l'efficienza energetica (Nindo and Tang, 2007), la possibilità di disidratare sostanze termosensibili (Kudra and Mujumdar, 2009) e un'ottima qualità dei prodotti ottenuti (Clarke, 2004). In un contesto globale in cui la produzione di alimenti è spesso eccessiva, ma la distribuzione non è altrettanto abbondante, le caratteristiche appena elencate sono di fondamentale importanza nel processo di disidratazione, il quale permette di agevolare notevolmente conservazione, trasporto e shelf-life dei prodotti alimentari.

In conclusione si vuole promuovere lo studio di questa tecnica perché secondo quanto riportato da vari autori (Mujumdar, 2006; Kudra and Mujumdar, 2009; Nindo and Tang, 2007) sembra essere una valida alternativa alle tecniche tradizionali di essiccazione; tuttavia il meccanismo di scambio termico della stessa non coincide con quanto dichiarato dai produttori.



# Appendice A

## Nomenclatura e valori

$\rho = 966.6 [kg\ m^3]$ : densità dell'acqua a 360 K (Perry and Green, 2008),

$v = 0.02 [m\ s^{-1}]$ : velocità media dell'acqua nei canali del RW,

$D_e = 0.05 [m]$ : diametro equivalente dei canali del RW,

$\mu = 3.15 \cdot 10^{-4} [kg\ m^{-1}\ s^{-1}]$ : viscosità dinamica dell'acqua a 360 K (Perry and Green, 2008),

$c_p = 4206 [J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$ : calore specifico dell'acqua a 360 K (Perry and Green, 2008),

$k_{H_2O} = 0.673 [W\ m^{-1}\ K^{-1}]$ : conducibilità termica dell'acqua a 360 K (Perry and Green, 2008),

$c_1 = 0.160 [-]$ : costante per il numero di Nusselt (Kreith and Boehm, 1999),

$c_2 = 0.699 [-]$ : costante per il numero di Nusselt (Kreith and Boehm, 1999),

$T_1 = 90 [^\circ C]$ : temperatura dell'acqua di servizio nel RW,

$T_{2p} = 85 [^\circ C]$ : temperatura della parete esterna del film di Mylar<sup>®</sup>,

$s_m = 2.5 \cdot 10^{-4} [m]$ : spessore del film di Mylar<sup>®</sup>,

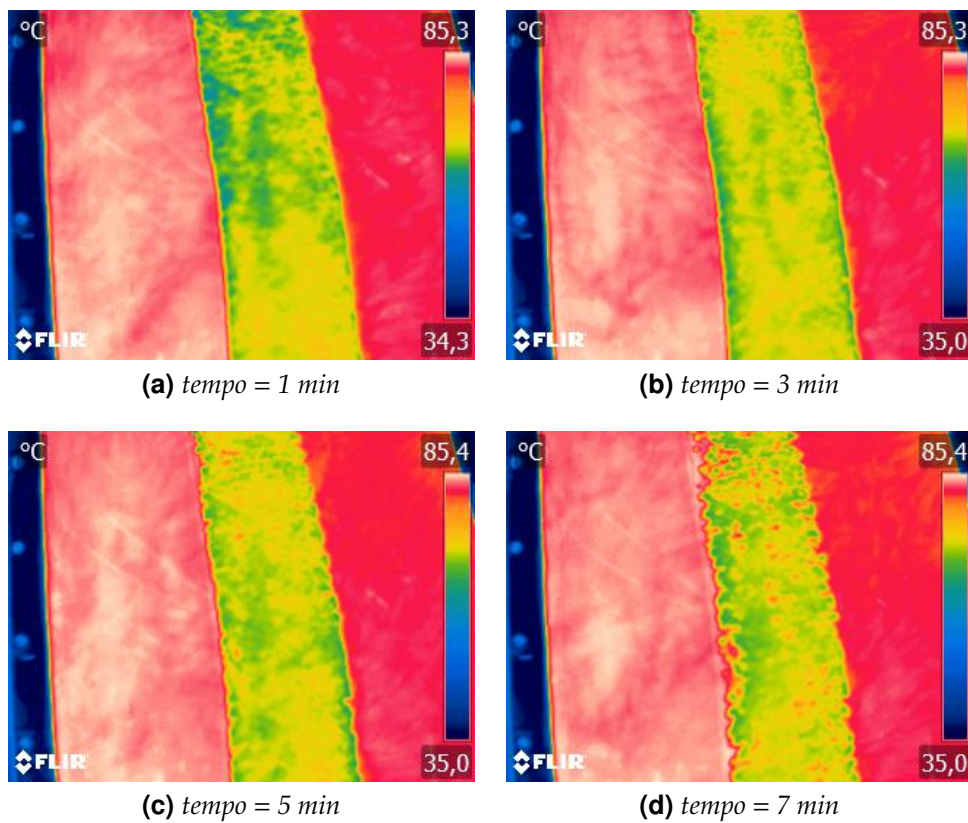
$k_m = 0.1239 [W\ m^{-1}\ K^{-1}]$ : conducibilità termica del Mylar<sup>®</sup> (DuPont, 2003b)

$\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} [W\ m^{-2}\ K^{-4}]$ : costante di Stefan Boltzmann

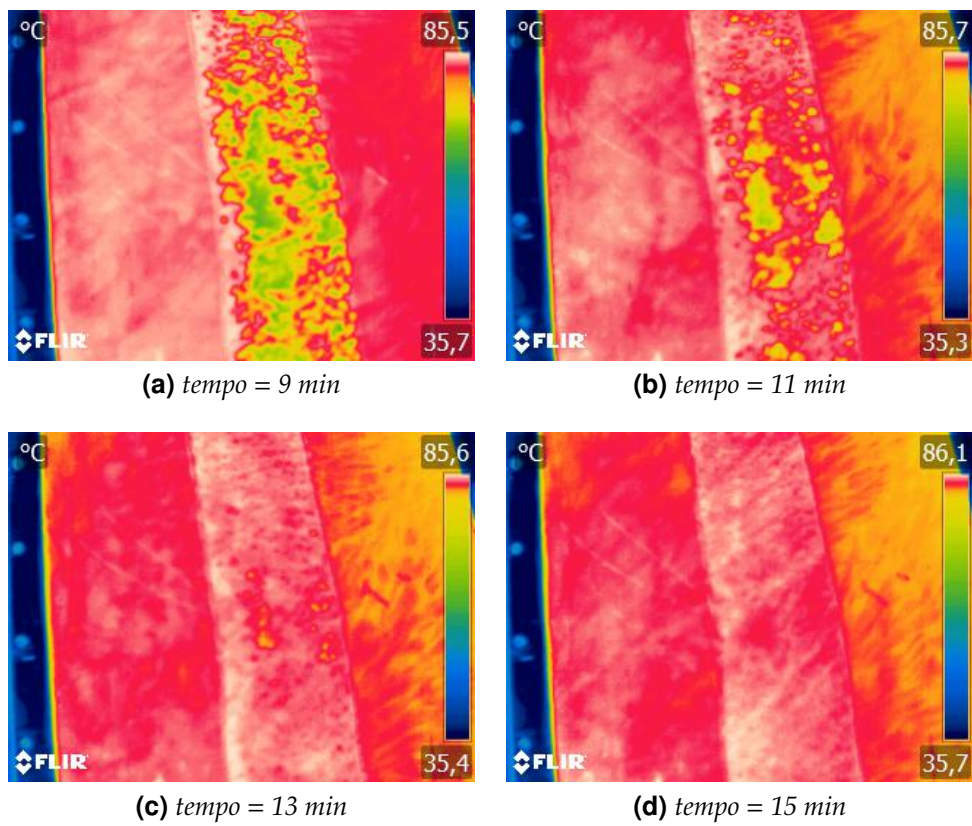
$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.96 [-]$ : emissività dell'acqua (Perry and Green, 2008)

# Appendice B

## Termografie



**Figura B.1:** Termografie durante un essiccamento di 15 minuti.



**Figura B.2:** Termografie durante un essiccamento di 15 minuti.

# Appendice C

## Brochure commerciale del Refractance Window

Si includono le pagine iniziale e finale dell'opuscolo informativo di 8 pagine totali distribuito da *MCD TECHNOLOGIES INCORPORATED*.

Versatile,  
Efficient,  
Innovative

## Refractance Window®Drying

This new technology uses water to transmit energy at the speed of light directly into the product to be dried. It may be used to dry an amazing variety of delicate products ranging from bio-active lactobacillus to scrambled egg mix to nutraceuticals.

## How It Works

A slurry of liquid product is evenly applied to the top surface of a continuous sheet of special plastic. This impervious conveyor belt floats upon the surface of hot water.

The patented principle of operation allows infrared energy in the circulating water beneath the belt to pass directly into the moist product. This rapidly dries it at atmospheric pressure rather than under a vacuum.

The process is self-limiting due to the nature of Refractance. As the product dries, the "Window" allowing the rapid transfer of infrared energy closes. Heat, conducted through the belt, evaporates the remaining moisture.

This rapid, gentle process provides superior retention of a product's beneficial properties, including nutrition, flavor, color and fragrance.



**Retains 94%  
of Vitamin C\*  
& Natural  
Color, Flavor,  
Aroma,  
Actives**

\*Results of Washington State University study sponsored by Washington Technology Center

## Environmentally Friendly

Energy efficient and with low water use, Refractance Window® drying also preserves air quality in and around the drying facility as little essence is lost. The process does not generate exhaust dust.

## Drying Rate

Many factors affect drying characteristics and rates. It is important to test dry your products. Please contact MCD to discover how we can help you better maintain your product's qualities.



# DEMONSTRATING THE RW™

MCD TECHNOLOGIES, INC.

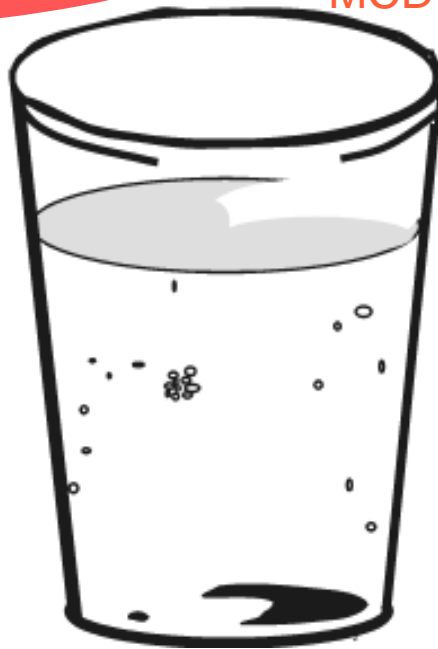
The key feature of MCD's Refractance Window® Dryer lies in the use of a transparent, plastic film upon which is placed the material to be dried, that film being floated on a heated body of water.

Heat is transmitted by three methods: conduction, convection and radiation. Water is one of the most effective heat transfer media in nature because all three heat transfer methods function within it. However, unlike some other materials, water does not transmit infrared energy by radiation to its surroundings.

Water returns its energy to its surroundings by either conduction or evaporation and actually by a combination of both. Therefore, if the surface of water is covered by a transparent medium, such as plastic, only conduction may take place, since the plastic halts the evaporation and associated heat loss. However, if a moisture-laden material (in this case, the material to be dried) is put in direct contact with the plastic surface, there is a window to the passage of infrared energy formed at the point of contact of the water-bearing material with the plastic where it bears on the water. Therefore, at that time, all three forms of heat transmission methods are allowed to operate and provide for exceedingly effective heat transfer to take place.

As the material dries, however, the infrared window closes, as little moisture remains to contact the plastic and the only heat transfer then taking place is by means of conduction. Since plastic is a very poor conductor, little heat is lost in this manner.

To better clarify this phenomenon, it may be helpful to consider two examples. First, consider any body of water. A reflective surface is formed at the interface between the air and the water. If one dives beneath the



surface of water in a lake or pond and looks up at the surface of the water, the surface appears mirror-like and reflective. This reflective surface at the water/air interface tends to trap infrared rays within the body of water. The major means of heat loss from the body of water is now: 1) through evaporation of the water at the surface or 2) through the transfer of energy by conduction directly from the water to an object that is in direct contact with the water.

Another example of this phenomenon can be shown through a simple experiment. Fill a smooth, transparent, straight-sided water glass with tepid water. Hold the glass in one hand, approximately six inches above eye level. Now, look through the side of the glass at the undersurface of the water. You will observe that it appears mirrored. This again, is an example of the air/water interface, which is reflective.

Keeping the glass in this position, use the index finger of your other hand to reach up and touch the water. You are able to see your finger when it is in contact with the water; however, if you raise your finger slightly so that it breaks contact with the water surface, the finger "disappears". You are able to see the finger only when it contacts

the surface of water.

Now place the glass on a table in front of you, so that you are able to look through the surface of the water to the far side of the glass. Notice that the far surface of the glass appears as if it were mirrored. This is a glass/air interface. In this instance, the air/water interface has been transferred from the water to the outside surface of the glass. Keep looking through the surface of the water and run your dry finger down the far side of the glass. Watch it disappear as it moves below the surface of the water.

Still looking through the surface of the water, wet your finger and again run it down the far side of the glass until it is below the level of the surface of the water. This time, you are able to keep your finger in view. The moist finger has provided a "window" to vision and also to the passage of infrared energy at that point. At that time, heat is transmitted from the water in the glass to your finger by three methods: conduction, convection, and radiation.

The MCD Dryer utilizes the refractive principle of the water's surface; the principle is harnessed by creating a window to the passage of infrared in order to dry material that is placed on a transparent film floating on the surface of the water. The drying of the material takes place in a most efficient manner. The heat loss from evaporation is minimal, since the body of water is essentially entirely covered by the floating film. The heat transfer that takes place is in locations where the product to be dried is resting on the film, so that the heat transfer is directly into the product to be dried and almost nowhere else on the sheet.

**MCD** TECHNOLOGIES  
INCORPORATED

2515 So Tacoma Way, Tacoma, WA 98409-7527  
Tel: 1+253-476-0968 Fax 1+253-476-0974  
info@mcdtechnologiesinc.com  
www.mcdtechnologiesinc.com

**ISO 9001:2000 Certified**

## Riferimenti bibliografici

- Abonyi, B. I. (2002). Quality retention in strawberry and carrot purees dried with refractance window system. *Journal of Food Science*, 67:1051–1056.
- Bird, R., Stewart, W., and Lightfoot, E. (2007). *Transport Phenomena*. Wiley.
- Çengel, Y., Dall'Ò, G., and Sarto, L. (2013). *Termodinamica e trasmissione del calore*. McGraw-Hill Companies.
- Clarke, P. T. (2004). Refractance window - down under. In *14th International Drying Symposium*, pages 813–820, San Paolo, Brasile.
- Dean, C. J. K. (1985). *Spray Drying Handbook*. K. Masters, 4 edition.
- DuPont, T. F. (2003a). Mylar, polyester film: Optical properties. Product Information.
- DuPont, T. F. (2003b). Mylar, polyester film: Physical-thermal properties. Product Information.
- Greenkorn, R. and Kessler, D. (1999). *Momentum, Heat, and Mass Transfer Fundamentals*. Marcel Dekker, Inc.
- Incropera, F. P. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.
- Kreith, F. and Boehm, R. (1999). *Heat and Mass Transfer. Mechanical Engineering Handbook*. CRC Press LLC.
- Kudra, T. and Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced Drying Technologies*. CRC Press, 2 edition.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

---

- Magoon, R. (1986). Method and apparatus for drying fruit pulp and the like. US Patent 4,631,837.
- Modest, M. (2013). *Radiative heat transfer*. Elsevier.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, 3 edition.
- Nindo, C. I. and Tang, J. (2007). Refractance window dehydration technology: A novel contact drying method. *Drying Technology*.
- Perry, R. H. and Green, D. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill, 8 edition.
- Siegel, R. and Howell, J. (1968). *Thermal radiation heat transfer*. Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration.
- Tang, J., Feng, H., and Shen, G. (2003). Drum drying. In *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. Marcel Dekker.
- Zotarelli, M. F. (2014). *Produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem*. PhD thesis, Universidade Federal De Santa Catarina.