



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE ALIMENTARI

**STUDIO DELL'ESSICCAMENTO DELLE MELE MEDIANTE LA  
REALIZZAZIONE DI UN ESSICCATORE SOLARE DIRETTO**

*An experimental study on drying of apples through the realization of a solar dryer*

TIPO TESI: sperimentale

Studente:

MATTEO BRAGONI

Relatore:

PROF. DANIELE DUCA

Correlatore:

PROF. GIOVANNI DI NICOLA

ANNO ACCADEMICO 2018-2019

# SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE .....	2
ELENCO DELLE FIGURE .....	3
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI.....	5
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI .....	6
CAPITOLO 1 L'ESSICCAMENTO.....	7
1.1 <i>Essiccamento Solare</i> .....	10
1.1.1 Spreco alimentare e l'importanza dell'essiccamento solare .....	11
CAPITOLO 2 METODOLOGIE DI ESSICCAMENTO.....	14
2.1 <i>La pratica dell'essiccamento</i> .....	16
2.1.1 Operazioni preliminari.....	18
2.1.2 Operazioni meccaniche.....	20
2.1.3 Variabili di processo.....	21
2.1.4 Requisiti essiccatori solari.....	23
2.2 <i>Classificazione essiccatori solari</i> .....	25
2.2.1 Essiccamento al sole all'aperto.....	25
2.2.2 Essiccatore solare diretto.....	27
2.2.3 Essiccatore solare indiretto.....	29
2.2.4 Essiccatore solare misto.....	32
2.3 <i>Studio dell'essiccamento solare delle mele</i> .....	33
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	38
3.1 Costruzione dell'essiccatore solare.....	38
3.2 Test di essiccamento solare delle mele.....	45
CAPITOLO 4 RISULTATI E DISCUSSIONI.....	50
CONCLUSIONI.....	61
BIBLIOGRAFIA.....	62

## ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 4-1: Risultati test 4 Giugno, varietà Golden Delicious	52
Tabella 4-2: Risultati test 13 Giugno, varietà Golden Delicious	53
Tabella 4-3: Risultati test 25 Giugno, varietà Golden Delicious	54
Tabella 4-4: Risultati test 2 Luglio, varietà Granny Smith	56
Tabella 4-5: Risultati test 25 Luglio, varietà Golden Delicious	57
Tabella 4-6: Risultati test 29 Agosto, varietà Granny Smith	59
Tabella 4-7: Risultati test 10 Settembre, varietà Golden Delicious	60
Tabella 4-8: Risultati Moisture Ratio	61

## ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Andamento delle reazioni chimiche in un alimento, in funzione della variazione dell'attività dell'acqua.....	9
Figura 1-2: Valore di soglia di $A_w$ per la sopravvivenza microbica negli alimenti.....	9
Figura 2-1: Modello di un essiccatore solare diretto.....	28
Figura 2-2: Modello di un essiccatore solare indiretto a circolazione forzata.....	30
Figura 2-3: Modello di un essiccatore solare indiretto a circolazione naturale.....	30
Figura 2-4: Modello di un essiccatore solare indiretto progettato da Goyal and Tiwari.....	31
Figura 2-5: Essiccatore solare misto.....	32
Figura 2-6: Produzione annuale media di mele dei primi cinque paesi (Fonte Italiafruit.net).....	33
Figura 2-7: Produzione annuale media delle mele delle prime cinque regioni italiane (Fonte Italiafruit.net).....	34
Figura 2-8: Variazione del contenuto di umidità di 1 kg di mele con e senza pezzatura. Esperimento effettuato da El-Sebaï et al.....	35
Figura 2-9: Variazione dell'umidità relativa delle mele durante l'essiccamento. Esperimento effettuato da Mustafa Atkas et al.....	37
Figura 3-1: Progetto essiccatore solare.....	38
Figura 3-2: Componenti essiccatore solare (1).....	39
Figura 3-3: Componenti essiccatore solare (2).....	40
Figura 3-4: Componenti essiccatore solare (3).....	40
Figura 3-5: Componenti essiccatore solare (4).....	41
Figura 3-6: Componenti essiccatore solare (5).....	41
Figura 3-7: Assemblaggio componenti essiccatore solare (1)...	42
Figura 3-8: Assemblaggio componenti essiccatore solare (2)...	42
Figura 3-9: Essiccatore assemblato (1).....	43

Figura 3-10: Essiccatore assemblato (2).....	43
Figura 3-11: Varietà Golden Delicious.....	45
Figura 3-12: Varietà Granny Smith.....	45
Figura 3-13: Bilancia digitale di precisione.....	46
Figura 3-14: Stufa per l'essiccamento delle mele.....	47
Figura 3-15: Campioni di mele all'interno della stufa.....	47
Figura 3-16: Campioni di mele all'interno dell'essiccatore solare.....	48
Figura 3-17: Termoigrometro digitale.....	48
Figura 3-18: Essiccatore in vetro.....	49
Figura 4-1: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious.....	50
Figura 4-2: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious.....	52
Figura 4-3: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious.....	53
Figura 4-4: Andamento T e UR, Varietà Granny Smith.....	53
Figura 4-5: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious.....	54
Figura 4-6: Andamento T e UR, Varietà Granny Smith.....	57
Figura 4-7: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious.....	57

## ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

Aw	Attività dell'acqua
FAO	Organizzazione delle nazioni unite per l'alimentazione e l'agricoltura
Kg	Chilogrammi
Mm	Millimetri
MR	Moisture Ratio
T	Temperatura
UR%	Percentuale di umidità relativa
C°	Gradi Centigradi
h	Ore
g	Grammi
DR	Drying Rate

## INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

In questa tesi sperimentale è stato realizzato un essiccatore solare diretto a circolazione naturale, progetto di un college americano, la Maharishi University di Fairfield.

Lo scopo della tesi è l'utilizzo dell'essiccatore per sperimentare l'essiccamento solare delle mele, misurando l'andamento della temperatura e umidità durante il processo.

L'essiccamento solare è un metodo economico, versatile e utilizzabile anche in ambito domestico, consente di ottenere prodotti a lunga conservazione, riducendo lo spreco alimentare che in questo decennio rappresenta un grave problema nel settore primario.

# Capitolo 1

## L'ESSICCAMENTO

L'essiccamento è un'operazione unitaria delle tecnologie alimentari che consiste in un trattamento termico dell'alimento al fine di rimuovere la quasi totalità dell'acqua in esso contenuta, passando da valori del 65-95 % ad un contenuto idrico del 10-15 %.

Tradizionalmente l'essiccamento veniva realizzato esponendo all'aria o alla radiazione solare i prodotti da essiccare, interi o porzionati per il tempo necessario all'ottenimento della stabilità. La durata dell'essiccamento dipendeva dalle condizioni meteorologiche e veniva effettuata in condizioni imprevedibili, in quanto legata a fattori non direttamente controllabili.

L'essiccamento permette di inibire la crescita dei microrganismi responsabili dell'alterazione degli alimenti che proliferano nella parte umida del prodotto. Asportando l'umidità si impedisce a questi microrganismi di moltiplicarsi, prevenendo la formazione di agenti patogeni per la salute.

Nell'essiccamento due aspetti sono di fondamentale importanza:

- Trasferimento del calore dalla fonte al prodotto
- Trasferimento dell'acqua dal prodotto verso l'esterno

In relazione a quest'ultimo è necessario calibrare il trattamento in base al processo di liberazione dell'acqua dall'alimento. All'inizio l'acqua migra abbondantemente dagli strati più interni a quelli più esterni attraverso le porosità dell'alimento e giunto in superficie evapora.

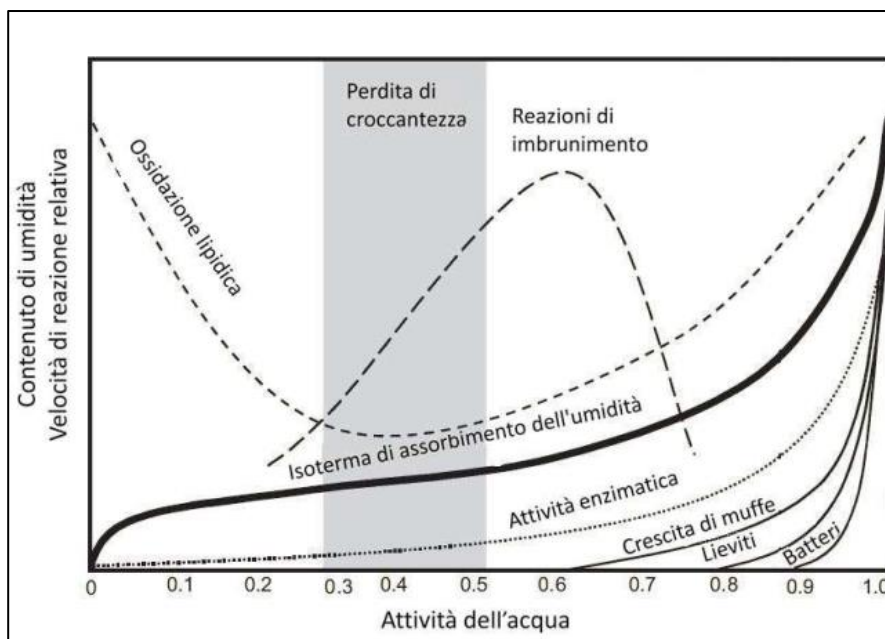


In un secondo momento, l'acqua residua diffonde verso l'esterno lentamente attraverso le microporosità, infine l'alimento tende all'equilibrio termogravimetrico con l'ambiente circostante. La quantità di acqua libera contenuta in una matrice biologica è uno dei parametri più importanti per prevederne la conservabilità. Per acqua libera si intende la quantità di acqua non impegnata in legami chimici con i costituenti della matrice e che quindi è disponibile come reagente per le reazioni chimiche e per le attività metaboliche dei microrganismi presenti.

L'attività dell'acqua è definita dalla formula  $A_w = P/P_0$  dove  $P$  è la pressione di vapore dell'alimento e  $P_0$  è la pressione di vapore dell'acqua pura alla stessa temperatura. Dal valore dell'attività dell'acqua ( $0 < A_w < 1$ ) dipende l'attività di tutte le specie di microrganismi ed anche la velocità di molte reazioni chimiche.

Sotto la soglia di sviluppo determinata dall'attività dell'acqua molti microrganismi non sono in grado di riprodursi, ma possono tornare a farlo qualora l'alimento fosse esposto ad una umidità sufficiente ad elevare il valore di  $A_w$  sopra tale soglia.

L'essiccamento è una tecnica di conservazione molto pratica poiché consente di mantenere gli alimenti a lungo senza alterare in maniera eccessiva le proprietà organolettiche. Si nota però una buona perdita di vitamina C. Inoltre, si può incorrere in altri svantaggi: Un prodotto essiccato deve essere reidratato prima di essere consumato. Gli alimenti però riassorbono solo circa i due terzi dell'acqua iniziale, tendendo a risultare più duri e gommosi rispetto all'origine. Alcuni alimenti possono subire alterazioni assumendo un colore scuro e un sapore amaro. Le proteine e gli zuccheri possono subire la reazione di Maillard, tanto preziosa in alcuni metodi di cottura, come dannosa nei metodi di conservazione perché può conferire un aspetto e un sapore sgradevole. Per questo motivo è utilizzata soprattutto per alcuni alimenti mirati, come latte, minestre, lievito, caffè in polvere e uova.



**Figura 1-1: Andamento delle reazioni chimiche in un alimento, in funzione della variazione dell'attività dell'acqua**

Valori di $a_w$ minimi per la crescita dei microrganismi			
Valore minimo di $a_w$	Gruppi di microrganismi	Esempi	
		Valore minimo di $a_w$	Microrganismi (generi o speci)
0,97-0,96	Bacilli gramnegativi	0,97	<i>Pseudomonas</i>
	<i>C. botulinum</i> tipo E	0,96	<i>Acinetobacter</i> , <i>E. coli</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Shigella</i> <i>C. botulinum</i> tipo E
0,95-0,91	Maggior parte dei batteri	0,95	<i>Salmonella</i> e altre <i>Enterobacteriaceae</i> <i>Bacillus</i> , <i>Clostridium</i> , <i>Microbacterium</i>
		0,94	<i>Lactobacillus</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Pediococcus</i>
0,94-0,87	Lieviti	0,94	<i>Candida utilis</i>
		0,88	Maggior parte dei lieviti patogeni
		0,87	<i>Debaryomyces</i>
0,90-0,86	Cocchi grampositivi	0,90	<i>Micrococcus</i>
		0,86	<i>Staphylococcus aureus</i>
0,93-0,80	Muffe	0,93	<i>Rhizopus nigricans</i>
		0,83	<i>Penicillium expansum</i>
		0,81	<i>P. patulum</i>
		0,80	Maggior parte delle muffe patogene
0,80-0,75 (0,60)	Batteri alofili	0,75	<i>Halobacterium halobium</i>
0,65-0,60	Lieviti osmotolleranti (-fili)	0,62	<i>Saccharomyces rouxii</i>
0,78-0,60	Muffe Xerotolleranti (file)	0,78	<i>Aspergillus flavus</i>
		0,77	<i>A. ochraceus</i>
		0,70	<i>A. glaucus</i>
		0,69	<i>Chrysosporium fastidium</i>
		0,60	<i>Xeromyces bisporus</i>

**Figura 1-2: Valore soglia di  $A_w$  per la sopravvivenza microbica negli alimenti**

## 1.1 Essiccamento solare

L'essiccamento solare è il metodo più antico di essiccazione, consiste nell'esporre le sostanze umide al sole e alle correnti d'aria. Esso è ancora largamente usato nell'agricoltura, nella vita domestica e in tutte le volte che si tratta di operazioni discontinue, per i quali non si possono sostenere spese d'impianto.

Molti paesi industrializzati sono incapaci di risolvere i problemi di distribuzione alimentare a causa del rapido incremento della popolazione mondiale negli ultimi anni, questo fenomeno ha importanti conseguenze nel "food balance".

La qualità e la quantità dei grani alimentari sono calate a causa delle scarse tecniche di processo e alla carenza di spazio degli impianti di stoccaggio. La massimizzazione delle produzioni alimentari dei piccoli agricoltori è piuttosto difficile e rappresenta una grande sfida. Per risolvere questo problema l'essiccamento è diventato una delle principale tecniche per la conservazione degli alimenti nelle aree a clima temperato. Tuttavia, l'essiccamento solare tradizionale (open sun drying) presenta molteplici svantaggi. Oltre alle problematiche di carattere igienico (inquinamento a causa di insetti, polveri ed uccelli) bisogna ribadire che la diretta esposizione ai raggi del sole può contribuire a degradare le caratteristiche sensoriali dei prodotti alimentari, i raggi ultravioletti, in particolare, degradano velocemente la parte direttamente esposta al sole. Per ovviare a questi problemi sono state realizzate macchine che riproducono le condizioni necessarie per portare a termine il processo di essiccamento in condizioni igieniche e ambientali adeguate.

Le moderne tecniche di essiccamento solare cercano di coniugare gli aspetti del processo naturale con le esigenze industriali, applicando il concetto di essiccamento per il mantenimento delle caratteristiche delle materie prime e dell'ambiente in cui vengono coltivate.

I dispositivi realizzati per effettuare efficacemente questa tipologia di essiccamento utilizzano prevalentemente l'energia solare per il loro funzionamento, schermandone gli effetti indesiderati e creando un ambiente di trattamento igienicamente idoneo, in sintonia con le caratteristiche microclimatiche dell'ambiente. L'utilizzo del sole come fonte prevalente di energia impone procedure e attenzioni particolari per portare a termine con successo questo processo, queste vanno coniugate con procedure di corretta gestione igienica dei prodotti da trattare, per ottenere prodotti sicuri, di alto valore nutrizionale ed idonei alla conservazione per lunghi periodi

#### 1.1.1 *Spreco alimentare e l'importanza dell'essiccamento solare*

Per spreco alimentare si intende generalmente quella parte di cibo che viene acquistata ma non consumata e che, quindi, finisce nella spazzatura. In un mondo in cui si parla di incrementare la produzione alimentare per nutrire una popolazione destinata a crescere sempre di più, uno dei paradossi più preoccupanti è costituito dallo spreco del cibo condotto a livello globale.

Secondo un articolo del *Foodheroes magazine* uno studio condotto dalla *FAO*, tra l'agosto del 2010 e il gennaio del 2011, intitolato *Global Food Losses and Food Waste* ha affermato che ogni anno, nel mondo, vengono sprecati circa 1,3 miliardi di tonnellate di cibo di cui l'80% ancora consumabile. Di questo miliardo 222 milioni sono le tonnellate di cibo che vengono sprecate nei paesi industrializzati. In Europa si sprecano, in media, circa 180 kg di cibo pro-capite all'anno. Il triste primato dello spreco spetta all'Olanda con 579 kg pro-capite l'anno. Il fanalino di coda è rappresentato dalla Grecia con i suoi 44 kg pro-capite l'anno, mentre l'Italia si trova in una posizione mediana tra i due esempi appena citati con 149 kg pro-capite l'anno.

Le perdite e gli sprechi di cibo avvengono a diversi livelli della catena di approvvigionamento alimentare, in particolare sono state individuate le tre fasi di questa filiera in cui si verificano gli sprechi maggiori:

- Fase produttiva
- Fase distributiva
- Fase del consumo

**Fase produttiva:** Con “fase produttiva” ci si riferisce a quanto avviene a monte della filiera agroalimentare, ovvero durante la coltivazione o l'allevamento, la raccolta e il trattamento della materia prima. In questa fase lo spreco maggiore avviene innanzitutto a causa delle scarse competenze nella gestione dei terreni agricoli, della mancanza di infrastrutture elettriche e idriche adeguate, di problemi di stoccaggio e trasporto delle merci.

**Fase distributiva:** In questa fase gli sprechi più consistenti avvengono principalmente durante la trasformazione industriale, dove vengono scartati i prodotti che esteticamente potrebbero non incontrare il gradimento del consumatore. In questa fase rientrano gli sprechi dovuti alla errata distribuzione o alle produzioni in eccedenza che determinano il cosiddetto “invenduto”.

**Fase del consumo:** In questa fase avvengono gli sprechi più consistenti principalmente nei Paesi ricchi, dove il problema si concentra alla fine della catena del cibo.

Tra le principali cause dello spreco troviamo:

- Le cattive abitudini di spesa di milioni di persone
- L'inosservanza delle indicazioni poste in etichetta sulla corretta modalità di conservazione degli alimenti
- Le date di scadenza troppo rigide

Nel mondo esistono numerose iniziative di intervento mirate alla riduzione e/o al recupero dei prodotti alimentari non più vendibili ma ancora commestibili.

Nei Paesi in via di sviluppo gli interventi riguardano soprattutto la fase produttiva. Qui gli interventi delle Organizzazioni non governative o degli stessi Governi (caso dell'India) sono volti principalmente a migliorare le tecniche di raccolta attraverso una formazione professionale adeguata dei contadini ed a promuovere la costruzione di impianti di stoccaggio in grado di garantire un'adeguata conservazione dei prodotti. L'essiccamento solare è una delle tecniche di conservazione più importanti per la riduzione dello spreco alimentare, poiché consente ai Paesi ad alto e a basso impatto socio-economico di sfruttare l'energia solare per la produzione di alimenti con un

elevata shelf-life, superando così le problematiche legate alla rigidità della data di scadenza.

## Capitolo 2

### METODOLOGIE DI ESSICCAMENTO

Questo capitolo tratta delle fasi dell'essiccamento solare e delle diverse tipologie di essiccatori solari. Si può suddividere il processo di essiccamento solare in cinque fasi.

1. **Pretrattamento:** I prodotti da essiccare sono oggetti di una prima lavorazione di preparazione eseguita in un ambiente igienico opportunamente attrezzato per consentire tutte quelle operazioni necessarie alla preparazione del prodotto da introdurre nell'impianto di essiccazione.
2. **Introduzione dei prodotti porzionati nell'impianto:** La vicinanza dell'ambiente dove avviene il pretrattamento dei prodotti con l'impianto di essiccazione facilita l'operazione di collocazione dei prodotti porzionati nei vassoi di appoggio da collocare dentro l'impianto. Questo sistema di vassoi, costruiti in materiale compatibile al trattamento di alimenti, deve garantire una superficie complessiva di appoggio di prodotti da essiccare pari ad almeno 5 mq.
3. **Essiccazione dei prodotti:** L'impianto di essiccamento deve garantire una portata d'aria di essiccazione idonea, essa deve essere opportunamente distribuita omogeneamente dentro l'impianto in modo da ottimizzare l'omogeneità del prodotto in uscita.
4. **Programmazione del processo:** Il processo di essiccamento deve poter essere programmato in coerenza con le diverse esigenze delle tante tipologie di prodotti essiccabili e delle condizioni climatiche locali.  
In tal senso, l'impianto sarà dotato di un idoneo pannello di programmazione, gestione e controllo, che deve garantire la gestione costante in automatico dei parametri in relazione alle esigenze del prodotto da essiccare.
5. **Conservazione dei prodotti da essiccare:** Terminato il ciclo di essiccamento al livello desiderato, il prodotto viene immediatamente trasferito

dall'essiccatore nei locali dove sono avvenute le operazioni preliminari. In questa fase, con le dovute condizioni igieniche, sarà realizzata la fase di conservazione del prodotto essiccato; a seconda delle caratteristiche del prodotto saranno impiegati metodi e materiali adatti per un efficace confezionamento e conservazione del prodotto essiccato.



## 2.1 La pratica dell'essiccamento

La gestione del ciclo produttivo è influenzato sia da fattori intrinseci legati alla natura del materiale da trasformare sia da fattori estrinseci, determinati quindi dal contesto nel quale avviene la produzione. La qualità finale del prodotto dipende fortemente dalle scelte dei parametri tecnologici riguardanti la trasformazione e il confezionamento. Tali scelte possono favorire la conservazione di certi composti ad alto valore nutritivo presenti nelle materie prime i quali, grazie a pretrattamenti o interventi tecnici specifici, possono essere ancora ritrovati nei prodotti finiti, migliorando la qualità nutrizionale del prodotto ed anche il valore commerciale dello stesso. Inoltre, va tenuto presente che alcune tipologie di materie prime (ad esempio prodotti freschi, zuccherini e ricchi di acqua) presentano all'inizio dell'essiccamento un complesso di fattori ideali per una veloce alterazione e richiedono quindi alti gradi di efficienza di estrazione d'acqua e l'adozione di particolari accorgimenti tecnologici.

**Fattori Intrinseci:** La natura della materia prima influenza in modo drastico il processo di essiccamento in funzione delle seguenti caratteristiche:

- **Genotipo** (presenza di buccia e/o semi, velocità di deterioramento, sensibilità all'imbrunimento, alta Aw)
- **Varietà** (tipo di buccia, presenza/tipo di semi)
- **Categoria merceologica**
- **Attività Enzimatica e Pretrattamenti**

A seconda del tipo di prodotto da essiccare si hanno forme e strutture completamente differenti. Tali differenze si evidenziano nella scelta del tipo di impianto da utilizzare o nella necessità di pretrattamenti, indispensabili per poter ottenere un prodotto essiccato di buona qualità.

Le diverse tipologie vegetali possono generare una casistica assai varia, di cui riporto alcuni esempi:

- **Presenza di grandi quantità d'acqua** (es. pomodoro): l'essiccamento solare richiede condizioni climatiche buone per molti giorni.
- **Velocità di deterioramento** (es. albicocca): è consigliabile solo in zone vocate e adottando pretrattamenti idonei.

- **Pezzatura di grandi dimensioni:** richiede una porzionatura in fette o cubetti. Se la materia prima è ricca di acqua l'essiccamento solare richiede condizioni climatiche buone per molti giorni.
- **Sensibilità all'ossidazione e all'imbrunimento delle zone di taglio:** è consigliabile adottare pretrattamenti idonei.
- **Presenza di semi non eduli:** se il prodotto finito deve essere denocciolato, la denocciolatura viene effettuata prima dell'essiccamento.
- **Presenza di buccia:** le materie prime vanno sbucciate o mondate prima dell'essiccamento.

E' noto che se si impiega una materia prima di basso valore commerciale (dipendente dalla categoria merceologica bassa o da un cattivo stato di conservazione) si avrà una resa produttiva molto scarsa e la qualità finale del prodotto ottenuto sarà altrettanto bassa. La resa risulterà esigua perché l'essiccamento è un processo di forte stress, specialmente all'inizio a causa della presenza contemporanea di varie condizioni favorevoli all'alterazione: alta Aw, alte temperature, presenza di zuccheri diluiti. Se le materie prime non sono fresche, si avrà un'alta percentuale di prodotto che si sarà alterato e che dovrà essere scartato, poiché non più idoneo al consumo.

La naturale presenza di attività enzimatica può avere un effetto negativo sulla qualità dei prodotti trasformati. Esistono dei pretrattamenti che permettono di preparare la materia prima allo stress che subirà durante l'essiccamento.

Tali pretrattamenti servono ad ottimizzare le condizioni per poter applicare le tecniche di essiccamento permettendo quindi alle materie prime di sottoporsi al trattamento in modo meno "traumatico" con risvolti positivi sulla qualità del prodotto finale.

### 2.1.1 *Operazioni Preliminari*

La maggior parte dei prodotti richiede una preparazione per essere idonea all'essiccamento, prodotti ricchi d'acqua possono richiedere una ulteriore eliminazione preventiva della stessa prima del processo di trasformazione, questa operazione può essere effettuata con mezzi meccanici o chimico/fisici. La presenza di acqua nei prodotti creano un ambiente ideale alla proliferazione batterica, è opportuno quindi creare condizioni idonee che non favoriscano questo processo.

Il pretrattamento ha due scopi principali, la predisposizione all'essiccamento e la modifica delle caratteristiche del prodotto. I pretrattamenti più comuni sono la scottatura, l'osmodisidratazione e l'immersione in soluzioni protettive.

**La Scottatura** permette di inattivare la maggior parte degli enzimi e si realizza immergendo le materie prime in acqua bollente per un tempo variabile che dipende principalmente dalla pezzatura del prodotto. I tempi di scottatura variano dai trenta secondi ai tre minuti. Appena terminata la scottatura il prodotto deve essere immediatamente immerso in un bagno di ghiaccio fondente.

Le materie prime vengono scottate nello stato nel quale verrebbero caricate nell'essiccatore: intere, sbucciate, denocciolate ecc...

Il tempo di scottatura deve essere determinato sperimentalmente su piccole quantità di prodotto, ad esempio realizzando differenti scottature per 30,60,120 secondi su aliquote di prodotto aventi le stesse caratteristiche di pezzatura dei prodotti da lavorare e successivamente si verifica l'attività enzimatica residua. Solitamente si utilizza come marker di scottatura l'attività enzimatica delle perossidasi. Questo gruppo è il più resistente al calore e la loro inattivazione può far presumere l'inattivazione di tutti gli altri enzimi. Una volta determinato il minor tempo di inattivazione enzimatica trovata per l'aliquota di prodotto, lo si utilizzerà per la scottatura di tutta la materia prima.

**L'Osmodisidratazione** è una tecnica che consiste nell'immersione del prodotto in una soluzione concentrata di zuccheri o sale (cloruro di sodio), per provocare una parziale disidratazione ed un arricchimento in solidi solubili. La perdita d'acqua avviene per differenza di pressione osmotica

(Ad esempio cospargere una fragola con zucchero cristallino comporta la comparsa di un liquido: tale liquido è l'acqua che è stata estratta dalla fragola per la differenza di pressione osmotica tra prodotto e zucchero). Il materiale pretrattato in questo modo risulta essere già parzialmente disidratato e presenta un'alta concentrazione di sale e zucchero. In tali condizioni il prodotto ottenuto dopo l'essiccamento mostra caratteristiche molto buone. Inoltre alcune materie prime trattate in questo modo permettono di ottenere un essiccato con un colore molto simile a quello di partenza (ad esempio albicocche). È un sistema che può avere diversi vantaggi, ma va commisurato alla tipologia di prodotto che stiamo trattando ed agli obiettivi finali che ci prefissiamo.

**L'immersione in soluzioni acidificate** è utile per rallentare le reazioni di imbrunimento per le varietà sensibili. L'immersione dura pochi minuti e può essere utilizzato, ad esempio aceto o succo di limone diluiti.

Anche se non è considerato un vero e proprio pretrattamento, è possibile essiccare prodotti frutticoli zuccherati in superficie al fine di dolcificarli e di creare sulla superficie uno strato dall'aspetto cristallino. Bisogna tuttavia considerare che l'utilizzo di quantità più o meno alte di saccarosio distribuite sulla superficie delle materie prime può generare gocciolamenti di succo durante l'essiccamento e rendere il processo più lungo, specialmente nel caso dell'essiccamento solare a causa della forte igroscopicità dello zucchero. Inoltre, la presenza di zucchero può innescare fenomeni di imbrunimento non enzimatico.

### 2.1.2 *Operazioni Meccaniche*

Le operazioni meccaniche sono strettamente correlate alla tipologia di prodotto che si intende ottenere, un'adeguata porzionatura consente di aumentare l'area esposta all'azione dell'aria, quindi aumenta l'efficienza del processo. Una compressione meccanica o una centrifugazione consentono di estrarre l'acqua in eccesso, ma anche questa operazione deve essere commisurata alla tipologia del prodotto e al risultato finale che vogliamo ottenere.

L'estrazione meccanica tende ad asportare anche proprietà specifiche del prodotto, le quali inevitabilmente seguono la parte acquosa, è necessario quindi stabilire il punto di equilibrio ideale che consenta una buona estrazione di acqua senza snaturare il prodotto.

### 2.1.3 Variabili di processo

Le variabili di processo per l'essiccamento dei prodotti ortofrutticoli sono rappresentate da:

- 1) Aw del prodotto essiccato.
- 2) Umidità delle materie prime al momento dell'inizio dell'essiccamento.
- 3) Quantità di materie prime da caricare nell'essiccatore per ogni ciclo di essiccamento.
- 4) Temperatura dell'aria e tempo di essiccamento.
- 5) Velocità e direzione dell'aria.

Nessuna delle variabili elencate è indipendente dalle altre e spesso non è possibile regolarne alcune.

- 1) Il livello di Aw raggiunto dal prodotto dipende dalla temperatura di essiccamento ed è legato alla natura del prodotto essiccato. In alcuni casi l'impianto non è in grado di estrarre una quantità d'acqua sufficiente per la stabilità del prodotto essiccato.
- 2) Dipende dal patrimonio genetico del prodotto lavorato e/o da eventuali pretrattamenti applicati. In generale, l'umidità delle materie è inversamente proporzionale al tempo necessario per l'essiccamento.
- 3) Questa variabile è correlata all'efficienza di essiccamento dell'impianto e va valutata di volta in volta, considerando le caratteristiche del materiale da essiccare. Nel caso dell'essiccamento solare è buona norma non caricare molte materie prime, specialmente se il prodotto è ricco d'acqua.
- 4) La scelta del binomio tempo/temperatura di essiccamento è molto importante nella definizione della qualità del prodotto ottenuto e permette di determinarne alcune importanti caratteristiche sensoriali e nutrizionali a fine processo.

Temperature alte permettono tempi di essiccamento brevi, ma anche un importante danno termico a quei composti ad alto valore nutrizionali termosensibili. Si è notato che a temperature più basse (e quindi tempi di essiccamento lunghi, tipici degli essiccatori solari) possono indurre reazioni di imbrunimento con contrastanti conseguenze sulla qualità: si ottiene un prodotto più scuro, ma allo stesso tempo più ricco di composti ad alto valore nutrizionale la cui sintesi è stata permessa dal lungo periodo di essiccamento.

Quanto appena affermato è strettamente correlato al tipo di prodotto trasformato: Ad esempio la vitamina C è un composto molto sensibile al danno termico, ma si è visto che agrumi in fetta, essiccati ad alte temperature (70°C) contengono più vitamina C dello stesso prodotto essiccato per tempi più lunghi a temperature minori (temperatura media 38°C). Quindi la scelta del binomio tempo/temperatura deve tenere anche conto del costo energetico della trasformazione e del tipo di comunicazione commerciale che il produttore intende adottare (ad esempio dando più importanza alla qualità nutrizionale, piuttosto che ad un'altra caratteristica).

5) In alcuni impianti è possibile regolare la velocità e la direzione dell'aria. Tale parametro influisce sull'efficienza dell'essiccamento e dipende dal tipo di materia prima usata, permettendo di dirigere il flusso parallelamente o trasversalmente.

#### 2.1.4 *Requisiti essiccatori solari*

Il funzionamento degli essiccatori solari presenta una stretta dipendenza dalla disponibilità del sole. Questi dispositivi espongono il prodotto ad aria calda e secca di giorno e fredda e molto umida di notte; questa alternanza permette al prodotto di riequilibrare il proprio livello di umidità interno con quello superficiale, favorendo un essiccamento omogeneo e permettendo lo sviluppo di una notevole resistenza alle muffe.

Gli essiccatori solari sono soggetti a molteplici requisiti poiché le parti essenziali costituenti gli impianti devono efficienti caratteristiche costruttive e performance di rendimento:

1. Devono essere adatti per le essiccazioni di ortaggi, frutta, carne e pesce in un ambiente pulito e semplice da utilizzare, leggero per essere installato in zone rurali e marginali limitrofe alla zona di coltivazione dei prodotti e quindi facilmente montabile e smontabile.
2. Devono avere una robusta struttura e consumi ridotti ed essere predisposto per un sistema fotovoltaico per renderlo completamente autonomo ed installabile ovunque.
3. Devono essere stati progettati nell'ottica della più completa sicurezza operativa e qualitativa, nel rispetto dell'ambiente e dei consumi energetici, adottando tecniche innovative ed efficaci per il raggiungimento di risultati significativi in termini di qualità dei prodotti ottenuti, sicurezza alimentare e riduzione delle risorse necessarie a tale scopo.
4. Devono utilizzare l'energia solare per riscaldare l'aria necessaria al processo di essiccazione, quindi devono avere una buona esposizione al sole, ma devono funzionare ed essere efficaci anche con ridotte esposizioni al sole poiché il processo di essiccamento deve continuare nelle sue varie fasi anche durante la notte.
5. Il processo di essiccazione deve avvenire in corrente d'aria calda al riparo dalla radiazione solare, per non degradare le caratteristiche organolettiche dei prodotti trattati.
6. La quantità di energia necessaria al suo funzionamento deve essere la più bassa possibile per essere installato in zone senza allacciamento alla rete elettrica.



7. Gli essiccatori solari devono funzionare anche in strutture non protette e quindi devono potere essere installati anche nei campi, vicini alla zona di raccolta dei prodotti da essiccare.
8. Devono essere semplici da utilizzare e avere una ridotta necessità di manutenzione, tali da permettere l'intervento di manutenzione anche a personale non specializzato.
9. Il ricambio e una buona distribuzione dell'aria fra i prodotti deve essere garantita da uno o più ventilatori ad alta portata, con alta efficienza e bassa necessità di interventi di manutenzione.
10. Il sistema di essiccazione deve essere dotato dei seguenti componenti tecnologici: a) una camera di essiccazione dotata di appositi vassoi di appoggio dei prodotti da essiccare; b) predisposizione per un'isola fotovoltaica, finalizzata principalmente a rendere funzionante l'impianto dei sistemi di programmazione, comandi, controllo e mantenimento; c) un'unità programmabile, per il comando e controllo dell'apparecchiatura, realizzata in ambiente protetto.
11. Gli impianti, nella loro completezza, devono garantire una portata dell'aria idonea all'essiccamento dei prodotti.

## 2.2 Classificazione degli essiccatori solari

L'incremento della popolazione mondiale negli ultimi anni ha avuto un grosso impatto nella distribuzione delle risorse alimentari, secondo Worldometers la popolazione mondiale ad Aprile 2019 ammonta a circa 7,7 miliardi persone.

La maggior parte dei Paesi in via di sviluppo sono incapaci a risolvere i problemi di distribuzione alimentare a causa del rapido incremento della popolazione nei rispettivi territori. La qualità e la quantità dei grani alimentari è deteriorata a causa delle scarse tecniche di conservazione degli alimenti e alla carenza di idonei impianti di stoccaggio. Per risolvere questi problemi l'essiccamento solare è diventata una delle tecniche più utilizzate per salvaguardare la produzione alimentare nelle aree con climi particolarmente soleggiati.<sup>1</sup>

Il dipartimento di ingegneria meccanica della Malesia ha presentato uno studio sulla struttura, sulle prestazioni e applicazioni degli essiccatori solari<sup>1</sup> classificandoli in sei categorie: All'aperto, Diretto, Indiretto, Misto, Passivo e Attivo.

### 2.2.1 *Essiccamento al sole all'aperto*

Il metodo di essiccazione più comune usato nei paesi tropicali e subtropicali prevede lo spargimento del prodotto in file strette su dei vassoi e la sua esposizione del prodotto al vento e al sole. I metodi di essiccazione al sole vengono classificati in base alla fase del procedimento, al luogo di essiccazione oppure alla tolleranza alle radiazioni solari.

Il procedimento di essiccazione all'aperto non è adatto per un gran numero di prodotti lavorati dalle multinazionali. Oltre agli svantaggi derivati dai costi più alti di lavorazione, dal bisogno di un'area più grande, e dal progressivo calo della qualità, questi prodotti necessitano anche di una lavorazione intensiva prima che possano essere immagazzinati. L'essiccamento al sole all'aperto dipende dalle condizioni atmosferiche, come l'intensità delle radiazioni solari, il vento e altri fattori ambientali.

Spesso porta al deterioramento dei prodotti dato che il vento, gli sprechi, la pioggia, gli animali e altri impedimenti causati dall'uomo provocano danni che incidono sulla quantità. Al tempo stesso mettere da parte il raccolto sotto un riparo durante la notte inaffiandolo può farlo inumidire nuovamente. Dato che il processo di essiccazione è relativamente lento si verificano danni inevitabili, come le infezioni portate dagli insetti, le reazioni enzimatiche, la proliferazione di micro-organismi e l'incremento delle micotossine che causano una significativa riduzione di qualità nel prodotto. Anche le essiccazioni non uniformi portano al deterioramento del raccolto durante l'immagazzinamento. I problemi più seri sorgono soprattutto nei climi tropicali e subtropicali umidi dove i prodotti agricoli devono per forza essere essiccati durante la stagione delle piogge. Tutti gli svantaggi che comporta il processo di essiccazione al sole ha fatto sì che venisse rimpiazzato con essiccatori meccanici, i quali usano i combustibili fossili per produrre l'elettricità necessaria a scaldare l'aria che viene poi diretta sui prodotti agricoli. Nonostante ciò, i vantaggi di applicare l'energia solare a sistemi di essiccazione ad alta temperatura non è fattibile né a livello tecnico né se fatto con cautela senza perdere qualcosa in affidabilità e capacità.

Jain e Tiwari<sup>2</sup> hanno studiato il comportamento termico dell'essiccazione al sole e hanno sviluppato un modello matematico. Hanno scoperto che il tasso di passaggio d'umidità è considerevolmente più alto per il cavolfiore e le patate a fette, e che la previsione della temperatura del raccolto, senza il tasso d'umidità, e le condizioni dell'aria sono dovute alle condizioni ambientali. L'essiccazione al sole all'aperto è un processo molto lento e può provocare perdite enormi. I prodotti essiccati in queste condizioni di solito non raggiungono gli standard di qualità internazionali.

### 2.2.2 *Essiccatore solare diretto*

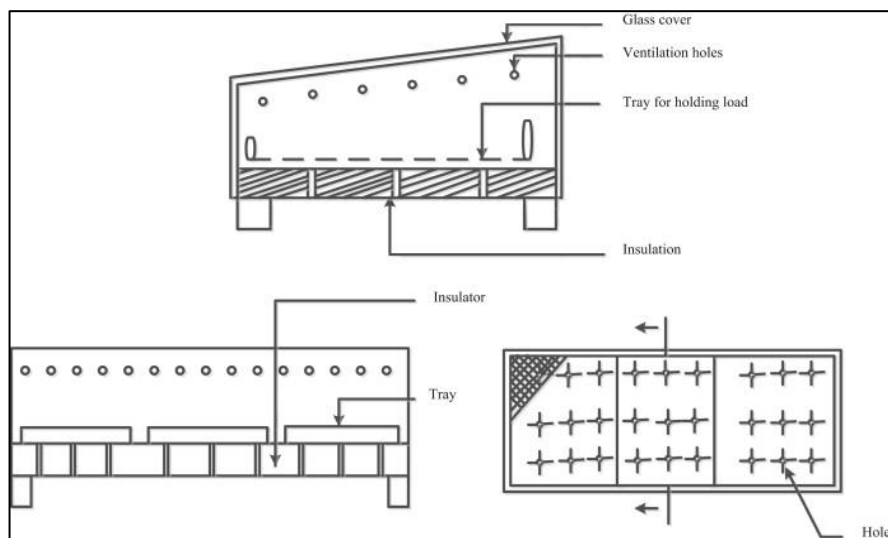
Come già accennato prima, l'essiccazione solare diretta è una buona alternativa all'essiccazione al sole all'aperto. Nelle essiccazioni di piccole quantità di frutta e verdura la tenda e il box d'essiccazione sono stati migliorati utilizzando i materiali che avevano a disposizione gli stessi agricoltori. In questo tipo di essiccatore solare si usa una copertura trasparente per ridurre le perdite di calore che contemporaneamente garantisce al prodotto una protezione dalla pioggia e dalla polvere. L'aria viene poi soffiata dentro per rimuovere l'acqua evaporata. In questo tipo di processo però è impossibile evitare le infestazioni. In molti paesi solo pochi contadini sono in grado di lavorare l'80% del raccolto durante il periodo di produzione. Muhlbauer et al.<sup>1</sup> hanno studiato la tenda e il box d'essiccazione e hanno descritto le loro performance nei suoi lavori, arrivando alla conclusione che la loro bassa capienza ne limita l'utilizzo.

L'esempio migliore di un essiccatore solare diretto è il box oppure l'essiccatore ad armadio. L'essiccatore solare diretto si usa normalmente nelle aree dove la luce del sole dura più a lungo. L'essiccatore solare ad armadio è costituito da un pezzo di legno pressato spesso 1 cm ed è completamente isolato dalla lana di vetro applicata nelle sue pareti interne, posteriori e inferiori. La parete frontale inclinata è ricoperta da uno spesso strato di vetro che permette alla luce di passarci attraverso. La parete trasparente può anche essere rivestita da uno strato opaco e isolante in modo da ottenere un processo di essiccazione indiretto. Nella parte posteriore dell'essiccatore ci sono dei buchi di scarico attraverso i quali, mediante un ventilatore, viene aspirata l'aria umida. La parte inferiore della parete frontale è fatta in modo tale da potere veicolare l'aria calda dal punto in cui si concentrano i raggi solari alla camera di ventilazione.

Zomorodian et al.<sup>3</sup> hanno discusso di un nuovo metodo di utilizzo dell'essiccatore solare diretto, ossia quello ad armadio, in cui il sole rappresenta la principale fonte di energia per l'essiccazione dei prodotti. Questo tipo di essiccatore è formato da tre parti: Il collettore, la camera di essiccamento e la ventola. Gli effetti principali di questo tipo di essiccatore sono l'assorbimento delle radiazioni solari, l'incremento della temperatura

del raccolto e l'emissione della radiazione ad onda lunga. Il modello ad armadio può presentare alcuni svantaggi. Ad esempio le colture possono subire un alterazione del colore a causa della diretta esposizione alle radiazioni solari.

Al Juamily et al.<sup>4</sup> hanno costruito e testato un essiccatore solare ad armadio, il quale è costituito da un collettore solare, una camera di essiccamento e una ventola, la temperatura è il componente principale che essicca le colture.



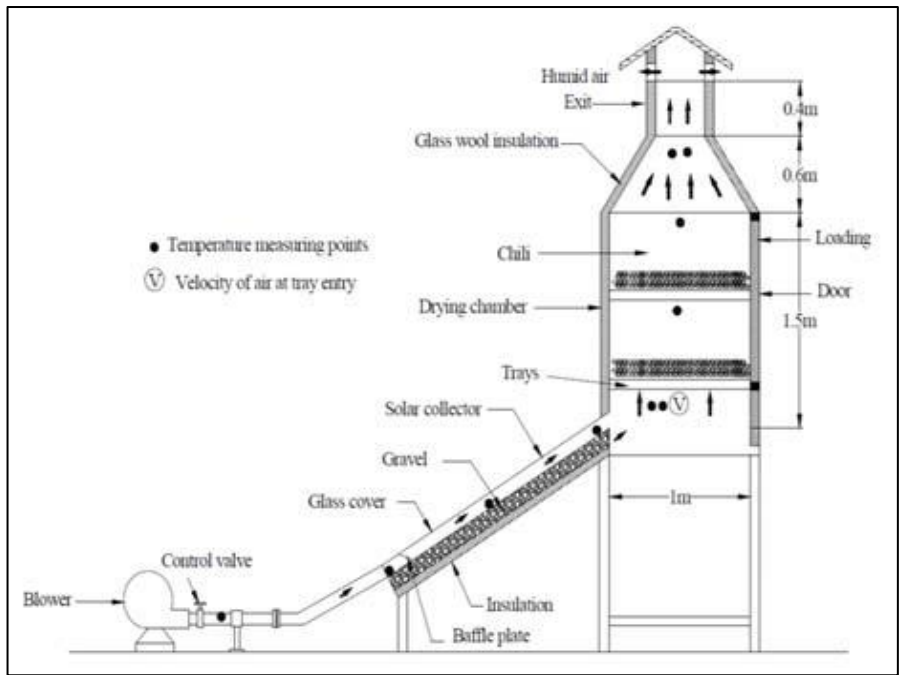
**Figura 2-1: Modello di un essiccatore solare diretto**

### 2.2.3 *Essiccatore solare indiretto*

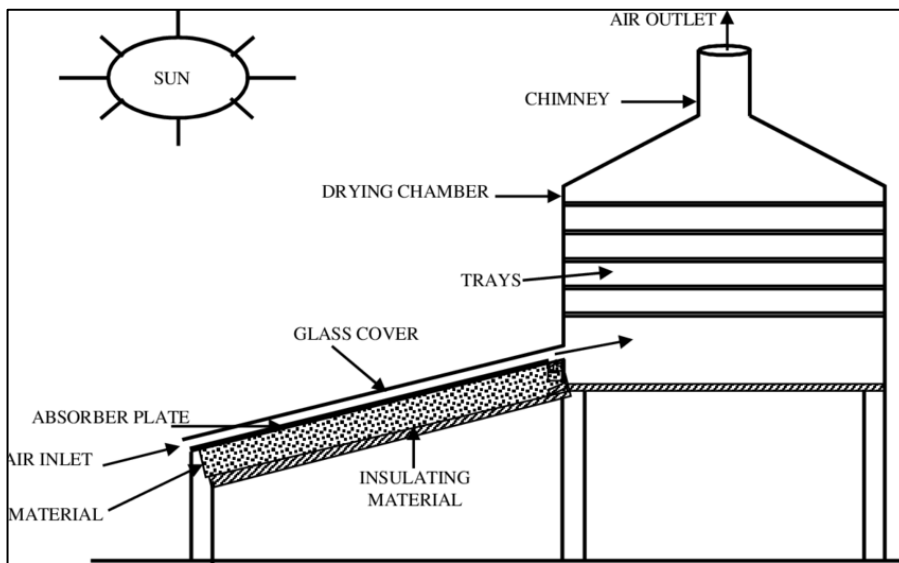
In un essiccatore solare indiretto l'aria viene prima raccolta dai collettori solari e poi trasmessa alla camera di essiccazione, dove avviene il processo. Basandosi su questo concetto, Goyal and Tiwari<sup>5</sup> (*Figura 2-4*) hanno progettato un essiccatore indiretto.

In questo modello l'aria entra nella camera di essiccazione, si riscalda, raggiunge i prodotti da essiccare, e caricatosi dell'umidità degli alimenti esce dall'essiccatore mediante una via di uscita. I collettori solari sono connessi e ciò permette un tempestivo riscaldamento dell'aria. Questa tipologia di essiccatore presenta dei vantaggi in termini di bilancio energetico e garantisce prestazioni migliori rispetto ai modelli convenzionali. Sharma et al<sup>6</sup> hanno esaminato le prestazioni di un essiccatore diretto e hanno scoperto che anche in condizioni meteorologiche ostili, l'essiccatore è in grado di garantire un adeguato processo di essiccamento. Questo modello è l'ideale per le piccole aziende agricole per i costi non elevati.

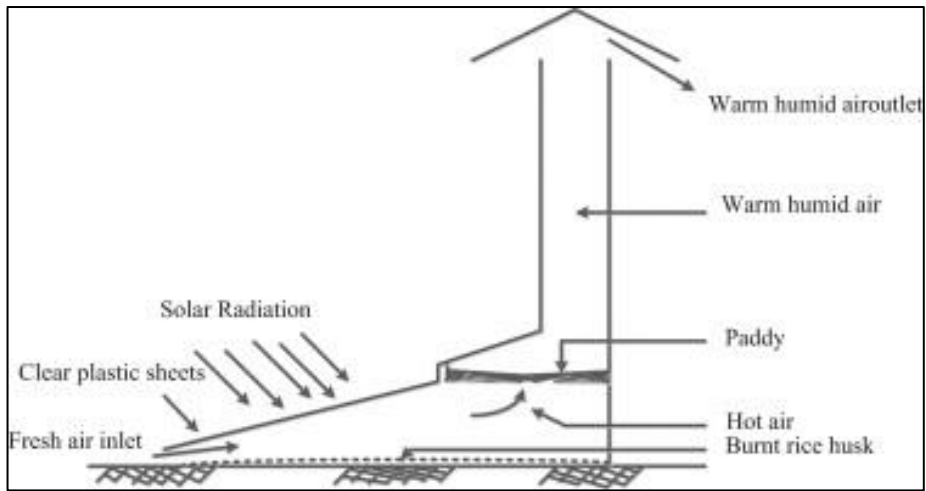
El-Sebaï et al hanno progettato e testato un essiccatore solare indiretto a circolazione naturale che utilizza una piastra assorbente.<sup>7</sup> Hanno registrato la radiazione solare, la distribuzione della temperatura nelle varie parti dell'essiccatore e l'umidità relativa, scoprendo che la durata dell'essiccamento diminuiva se le colture erano state precedentemente trattate.



**Figura 2-2: Modello di un essiccatore solare indiretto a circolazione forzata**



**Figura 2-3: Modello di un essiccatore solare indiretto a circolazione naturale**



*Figura 2-4: Modello di un essiccatore solare indiretto progettato da Goyal and Tiwari*



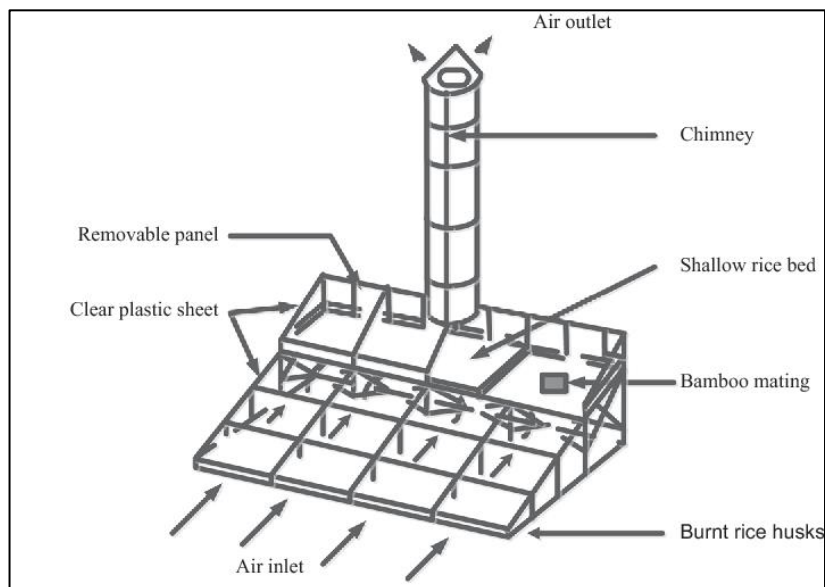
#### 2.2.4 Essiccatore solare misto

L'essiccatore solare a modalità mista non contiene parti mobili, motivo per cui viene chiamato "l'essiccatore passivo". Questo tipo di essiccatore ricava energia dai raggi solari, i quali vengono catturati dal collettore, dipinto appositamente di nero.

La *figura 2-5* mostra le caratteristiche essenziali di un essiccatore misto. Questo modello è costituito da un collettore separato, da un singolo reparto di essiccamento e un coperchio trasparente è affisso in cima all'essiccatore.

Exell e Kornsakoo<sup>1</sup> hanno presentato un essiccatore a modalità mista, semplice ed economico agli agricoltori. Questo modello viene utilizzato spesso per l'essiccazione dei prodotti anche durante la stagione delle piogge.

Zomorodian et al.<sup>1</sup> hanno progettato un essiccatore a modalità mista attivo per l'essiccamento del riso. Esso è costituito da una camera di essiccazione, un foro di entrata e di uscita ed un plenum per la distribuzione dell'aria. Questo sistema garantisce un essiccamento efficiente con i prodotti che raggiungono un umidità relativa finale intorno al 13%.



**Figura 2-5: Essiccatore solare misto**

### 2.3 Studio dell'essiccamento solare delle mele

Le mele rappresentano il primo prodotto frutticolo a livello di consumi familiari oltre ad essere il motore trainante dell'export nazionale di settore. Secondo dati Faostat 2014 la produzione mondiale di mele si attesta a circa 84 milioni di tonnellate, il primo Paese rimane la Cina, con oltre 40 milioni di tonnellate. Escludendo il gigante asiatico, il cui raccolto è prevalentemente per consumo interno, il più grande produttore è rappresentato dagli Stati Uniti con una produzione di circa 4 milioni di tonnellate. A seguire, a pari merito, la Turchia e la Polonia, entrambe con circa 2,7 milioni di tonnellate, in crescita costante. L'Italia invece vede la sua produzione rimanere costante da ormai oltre 30 anni, con una quota di circa 2,2 milioni di tonnellate. Vero e proprio astro nascente è l'India, che dagli anni Ottanta ad oggi ha più che raddoppiato i volumi di mele arrivando a circa 2,2 milioni di tonnellate.

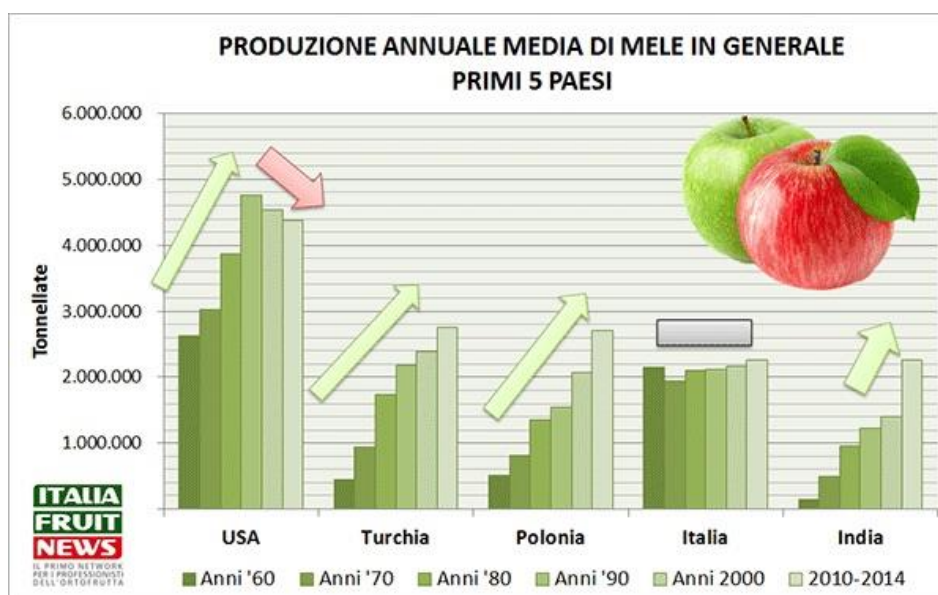
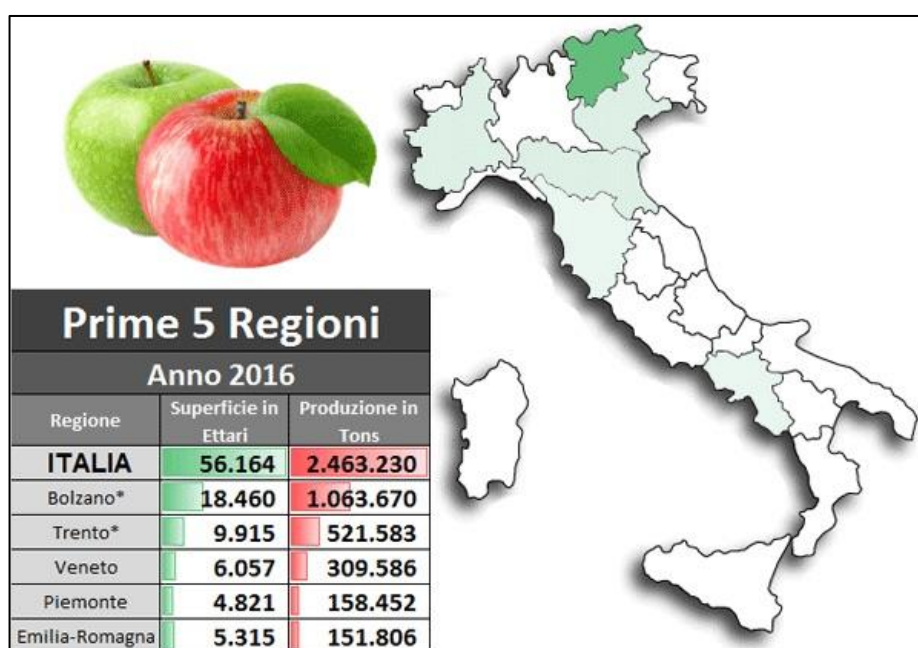


Figura 2-6: Produzione annuale media di mele dei primi cinque paesi (Fonte Italiafruit.net)

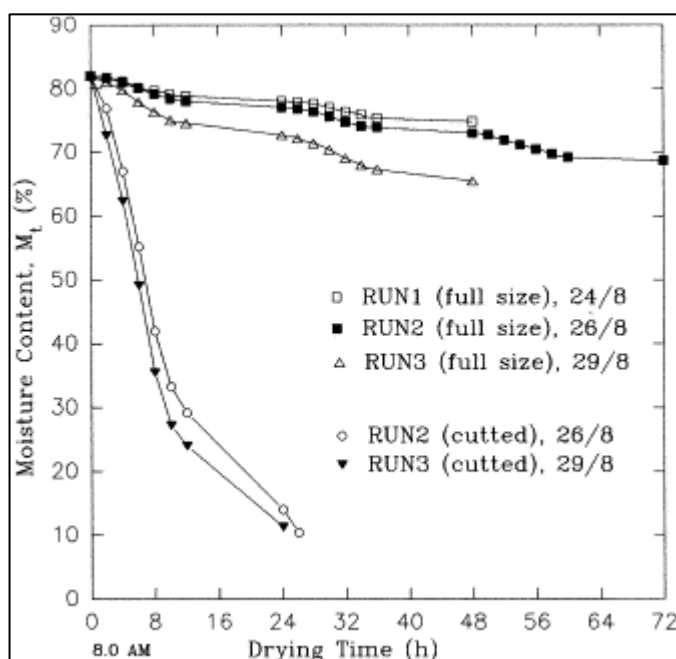
Stando ai dati Istat aggiornati al 2016, la produzione italiana di mele è di 2,4 milioni e si concentra sostanzialmente nelle due provincie di Trento e Bolzano. Queste ultime hanno infatti prodotto nel 2016 un milione di tonnellate (Bolzano) e oltre 500 mila tonnellate (Trento), su un totale di oltre 28 mila ettari. La restante quota di Made in Italy è prodotta in Veneto (oltre 300 mila tonnellate), Piemonte (158 mila tonnellate) e Emilia-Romagna (151 mila tonnellate).



*Figura 2-7: Produzione annuale media delle mele delle prime cinque regioni italiane (Fonte Italiafruit.net)*

La mela è uno dei prodotti più importanti del settore ortofrutticolo mondiale. Per preservare le qualità sensoriali delle mele e garantire una lunga conservabilità l'essiccamento è uno dei processi di trasformazione più utilizzati, in particolare l'essiccamento solare. Quest'ultimo presenta notevoli vantaggi in ambito ambientale ed economico.

L'essiccamento solare della mela è stato oggetto di studio in diversi Paesi per valutare le prestazioni dell'essiccatore e studiarne la cinetica di essiccamento. In Egitto A.A. El-Sebaii e S. Aboul-Enein<sup>7</sup> hanno sperimentato l'essiccamento delle mele mediante l'utilizzo di un essiccatore solare indiretto. I prodotti sono stati tagliati a fette e trattati chimicamente per aumentare la diffusione di umidità dall'interno dei prodotti, aumentando così il tasso di evaporazione dalla superficie. La *figura 2-8* mostra le variazioni del contenuto di umidità di 1 kg di mele durante l'essiccamento, quando le mele vengono essiccate per intero, l'umidità iniziale decresce passando dall'82% al 74,8%, 73,9% e 65,46% nei vari cicli di essiccamento dopo 48 ore. La stessa quantità di mele, precedentemente affettate, raggiunge il 13,5% di umidità mantenendo lo stesso valore in equilibrio con l'ambiente dopo 24 ore. E' evidente che la pezzatura incide fortemente sul valore dell'umidità finale dei prodotti.



**Figura 2-8:** Variazione del contenuto di umidità di 1 kg di mele con e senza pezzatura. Esperimento effettuato da El-Sebaii et al.

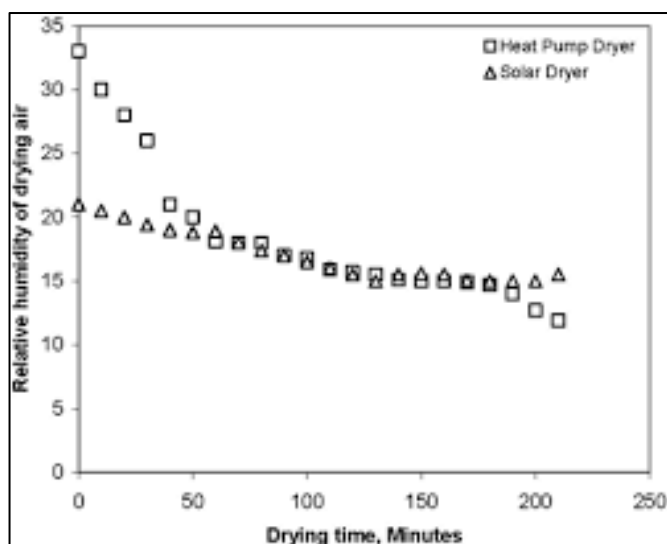
In Turchia Mustafa Atkas et al.<sup>8</sup> hanno determinato le caratteristiche di essiccamento delle mele. I prodotti sono stati affettati con uno spessore di 4 mm ed in seguito pesati in una bilancia digitale di precisione di 0,01 kg. La misura dell'andamento della temperatura e umidità relativa è stata ottenuta grazie ad un termoigrometro contenente un indicatore digitale. Durante questi esperimenti il moisture ratio e il drying rate sono stati calcolati utilizzando le seguenti equazioni:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

$$DR = \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

Dove MR è il moisture ratio,  $M_t$  la quantità di umidità al tempo  $t$ ,  $M_e$  la quantità di umidità all'equilibrio e  $M_0$  il contenuto di umidità iniziale. L'equazione (1) è molto importante nella valutazione del processo di essiccamento poiché “ MR è un parametro che quantifica la riduzione del contenuto di umidità del campione nel tempo.”<sup>9</sup>

La seconda equazione invece, rappresenta il tasso di essiccamento, ovvero il rapporto tra la quantità di umidità rimossa (per unità di superficie essiccata) e il tempo di essiccamento.



*Figura 2-9: Variazione dell'umidità relativa delle mele durante l'essiccamento. Esperimento effettuato da Mustafa Atkas et al.*

Le equazioni (1) e (2) sono state utilizzate in diversi esperimenti riguardanti l'essiccamento solare delle mele, come in Spagna da L. Blanco-Cano, A. Soria-Verdugo et al. nello studio dell'essiccamento delle mele Granny Smith mediante un essiccatore solare indiretto<sup>9</sup>, in Iran da E. Meisami-asl e S. Rafiee, i quali hanno studiato l'essiccamento delle mele "Golab" una varietà locale molto diffusa<sup>10</sup> e in Malesia da Ahmad Fudholia, Kamaruzzaman Sopiana et al.<sup>11</sup>.

Molti di questi esperimenti si sono svolti in Turchia. In Ankara Ahmet Konuralp et al. hanno utilizzato un "solar tunnel dryer" per l'essiccamento delle mele confrontando le prestazioni con l'essiccamento solare all'aperto (open sun drying). Dai dati si è riscontrato che i prodotti sono stati essiccati in trentasei ore, raggiungendo un valore di umidità finale dell'11% dal 82% iniziale, rispetto alle quarantotto in caso di un essiccamento all'aria aperta.<sup>12</sup> Sempre in Turchia, a Trabzon, A. Kaya et al.<sup>13</sup> hanno studiato la cinetica di essiccamento delle mele Red Delicious, utilizzando le equazioni (1) e (2) precedentemente citate. La mela è uno dei frutti più importanti in questo paese, ogni anno vengono prodotte 11,5 milioni di tonnellate.<sup>14</sup> Il dipartimento di agricoltura di Ankara sta studiando e sperimentando diverse metodologie di essiccamento per preservare le proprietà sensoriali di questo prodotto

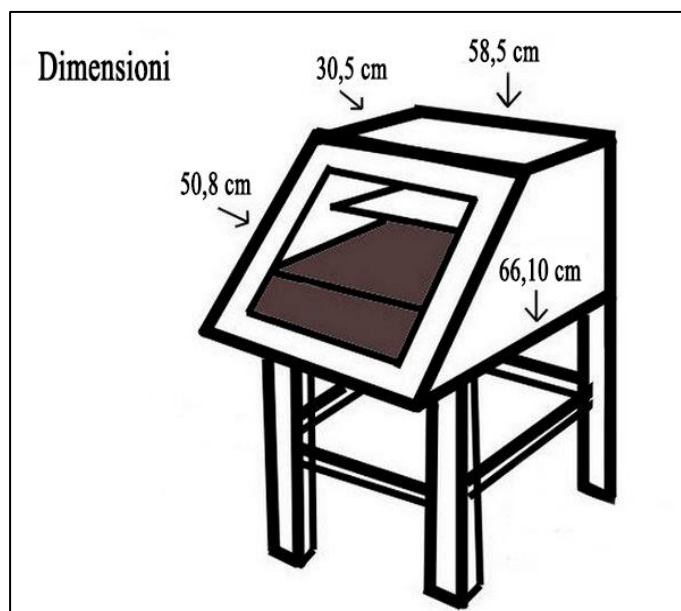
## Capitolo 3

### MATERIALI E METODI

#### 3.1 Costruzione dell'essiccatore solare

La prima fase della tesi sperimentale è stata la costruzione dell'essiccatore solare, la realizzazione si è svolta presso l'officina dell'Università Politecnica delle Marche grazie all'aiuto del tecnico Gabriele Gabrielli.

Il modello dell'essiccatore è un progetto della Maharishi University of Management di Fairfield, nello Iowa (Stati Uniti), il quale è stato pubblicato nel sito greenMe.it.



*Figura 3-1: Progetto Essiccatore Solare*

La tipologia del progetto è quella di un essiccatore solare diretto, il cui funzionamento è stato descritto accuratamente da A. Mustayen et al.<sup>1</sup> i quali hanno delineato le caratteristiche delle varie tipologie di essiccatori solari. La struttura dell'essiccatore è stata costruita con il legno di recupero proveniente da una lavagna e da varie lastre di legno recuperate in officina. Il resto dei materiali utilizzati per l'assemblaggio sono le viti da legno ed il vetro per la realizzazione dello sportello della camera di essiccamento, opportunamente inclinato di 45°.



*Figura 3-2: Componenti Essiccatore Solare (1)*





*Figura 3-3: Componenti Essiccatore Solare (2)*



*Figura 3-4: Componenti Essiccatore Solare (3)*



*Figura 3-5: Componenti Essiccatore Solare (4)*



*Figura 3-6: Componenti Essiccatore Solare (5)*



*Figura 3-7: Assemblaggio Componenti Essiccatore Solare (1)*



*Figura 3-8: Assemblaggio Componenti Essiccatore Solare (2)*



*Figura 3-9: Essiccatore Solare assemblato (1)*

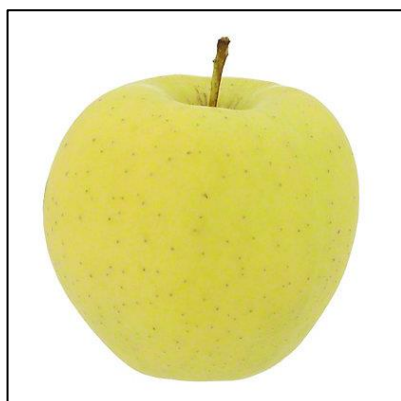


*Figura 3-10: Essiccatore Solare assemblato (2)*

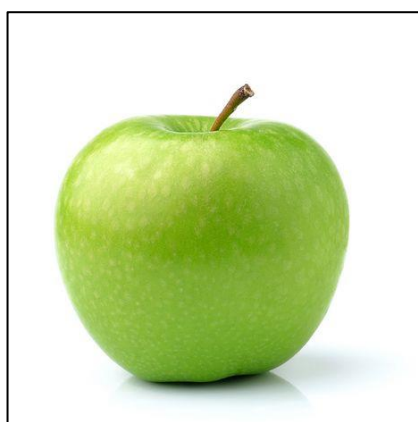
In seguito all'assemblaggio dell'essiccatore sono stati posizionati sul fondo dello stesso il collettore solare, costituito da una lastra di metallo verniciata di colore scuro in modo che possa trattenere al meglio il calore. Inoltre, sono stati applicati una serie di fori ai lati e sul lato posteriore dell'essiccatore per consentire l'ingresso e l'uscita dell'aria durante il processo di essiccamento, mentre il porta-campioni è costituito da una cassa di frutta in plastica.

### 3.2 Test di essiccamento solare delle mele

La sperimentazione si è svolta presso il laboratorio biomasse dell'Università Politecnica delle Marche. Si è scelto di essiccare due varietà di mele: La Golden Delicious e la Granny Smith, quest'ultima è stata oggetto di analisi in Spagna grazie a L.Blanco-Cano et al.<sup>9</sup>



*Figura 3-11: Varietà Golden Delicious*



*Figura 3-12: Varietà Granny Smith*

In totale sono stati svolti sette test nel periodo Giugno-Settembre:

- A) 4 Giugno, Golden Delicious, 4 Campioni
- B) 13 Giugno, Golden Delicious, 4 Campioni
- C) 25 Giugno, Golden Delicious, 8 Campioni
- D) 2 Luglio, Granny Smith, 8 Campioni
- E) 24 Luglio, Golden Delicious, 5 Campioni
- F) 29 Agosto, Granny Smith, 7 Campioni
- G) 10 Settembre, Golden Delicious, 6 Campioni

Il primo step della sperimentazione consiste nel posizionamento dell'essiccatore solare. Esso va puntato verso sud in direzione della luce solare. In seguito si affettano le mele ad uno spessore compreso tra i 5 e i 9 mm con l'ausilio di un'affettatrice costituita da una lastra di legno a L ed un coltello. Grazie all'affettatura si ottengono 6-8 campioni da due mele, numeri che variano a seconda dello spessore delle materie prime.

Dopo la pezzatura si inseriscono i campioni in delle vaschette di alluminio dal peso di 5,64 g e si pesano utilizzando una bilancia digitale di precisione 0,01 kg (*figura 3-13*).



***Figura 3-13: Bilancia digitale di precisione***

Annotato il peso dei campioni, essi sono pronti per il trattamento nell'essiccatore, mentre due campioni sono utilizzati per essere essiccati direttamente nella stufa per 24 h a 70 C° (*figura 3-14*) al fine di calcolare la quantità di umidità totale delle mele.

Il trattamento di essiccazione solare consiste nell'essiccamento delle materie prime per un totale di otto ore dalle 10 alle 18.

Sono stati utilizzati due termoigrometri digitali (*figura 3-17*) per la misurazione della temperatura (T) e umidità relativa (UR) all'interno e all'esterno dell'essiccatore.



*Figura 3-14: Stufa per l'essiccamento delle mele*



*Figura 3-15: Campioni di mele all'interno della stufa*





*Figura 3-16: Campioni di mele all'interno dell'essiccatore solare*



*Figura 3-17: Termoigrometro digitale*

Durante il processo di essiccamento solare il collettore riscalda l'aria interna, la quale è entrata attraverso i fori, situati alla base e sul lato posteriore dell'essiccatore, si carica di umidità essiccando le materie prime ed esce dalla struttura attraverso gli stessi. L'essiccamento dei campioni avviene attraverso una circolazione naturale dell'aria.

Terminato il trattamento si annota il peso dei campioni e si inseriscono nella stufa, a 70 C° per 24 h, eccetto due, i quali vanno posti all'interno di un essiccatore in vetro (*figura 3-18*) per 24 h al fine di misurare l'umidità relativa di equilibrio. L'UR di equilibrio è il valore di UR%, a una data temperatura, al quale un prodotto igroscopico non scambia umidità con l'ambiente che lo circonda.

L'umidità di equilibrio è raggiunta quando le quantità di acqua assorbita e rilasciata si equivalgono.

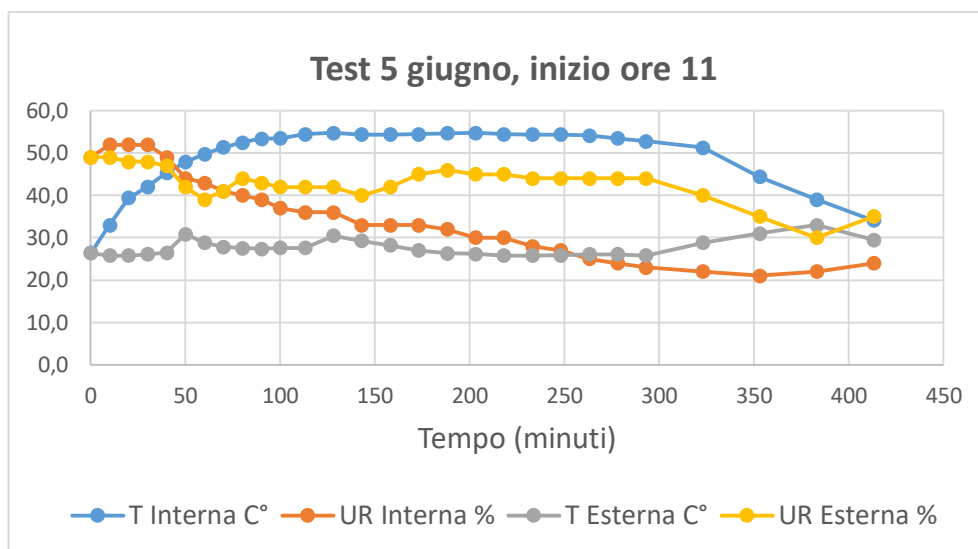


*Figura 3-18: Essiccatore in vetro*

## Capitolo 4

### RISULTATI E DISCUSSIONI

Il primo test si è svolto il 5 giugno, è stata essiccata soltanto una mela Golden Delicious per testare le prestazioni dell'essiccatore.



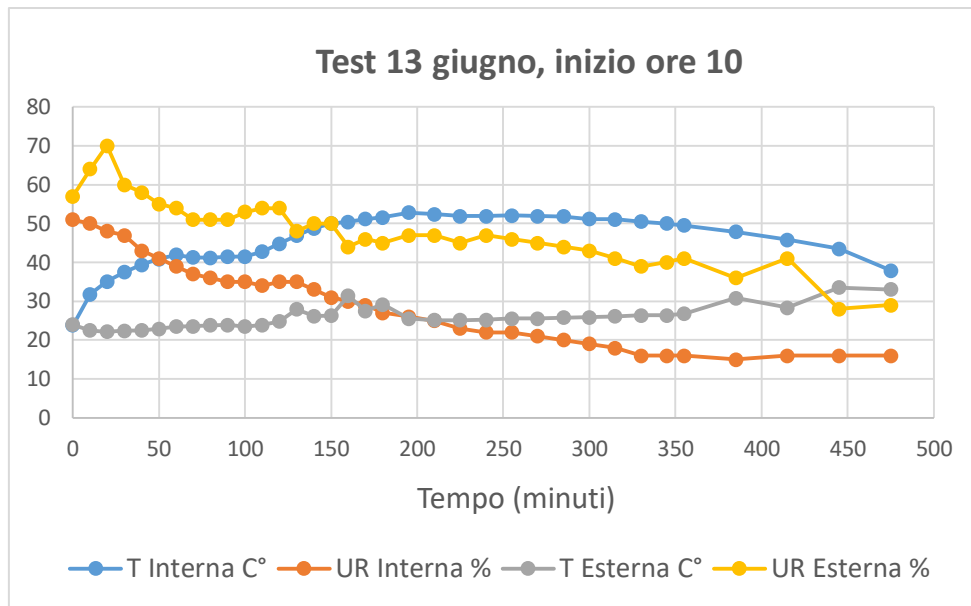
**Figura 4-1: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious**

In questo primo test di prova è stata essiccata una mela, costituita da quattro campioni dallo spessore tra i 5 e i 9 mm.

Da questo grafico (*figura 4-1*) si è potuto osservare che la temperatura all'interno della camera di essiccamento sale gradualmente fino a stabilizzarsi intorno ai 54 C°. Durante il processo di essiccamento l'umidità dei campioni diminuisce fino al 22% per poi risalire al 24% (*figura 4-1*), probabilmente ciò è dovuto all'assenza di luce durante l'ultima ora del test.

<b>Campione Tale Quale (In g)</b>	<b>Dopo Essiccamento (7 h)</b>	<b>% UR rimossa dopo Essiccamento</b>
21,04	7,04	66,53
20,31	8,16	59,82
21,77	8,41	61,36
21,51	5,46	74,61

*Tabella 4-1: Risultati test 5 giugno, Varietà Golden Delicious*

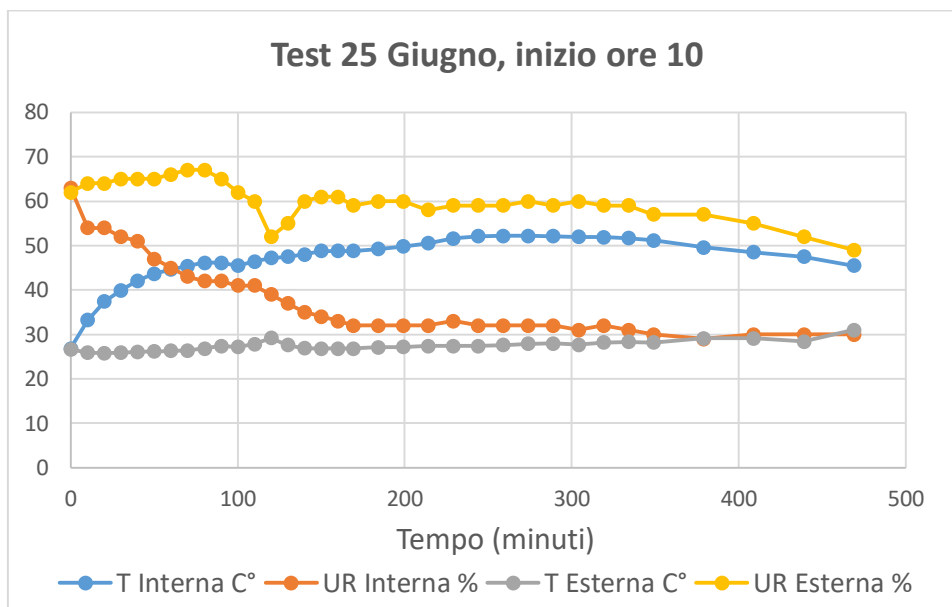


**Figura 4-2: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious**

Il 13 giugno sono stati essiccati quattro campioni ottenuti da una Golden Delicious. E' stata una giornata particolarmente secca, distinta da un'umidità media esterna del 48% e temperature che si aggiravano intorno ai 25-26 C° (figura 4-2). Il test è stato soddisfacente, l'umidità interna dei campioni ha raggiunto il 16%, valore prossimo ai risultati ottenuti da El Sebaii et al<sup>7</sup>.

<b>Campione Tal Quale (in g)</b>	<b>Dopo Essiccamento (8 h)</b>	<b>% UR rimossa dopo Essiccamento</b>
29,12	10,11	65,28
21	8,07	61,57
20,01	7,95	60,26
26,35	9,53	63,83

**Tabella 4-2: Risultati test 13 giugno, Varietà Golden Delicious**

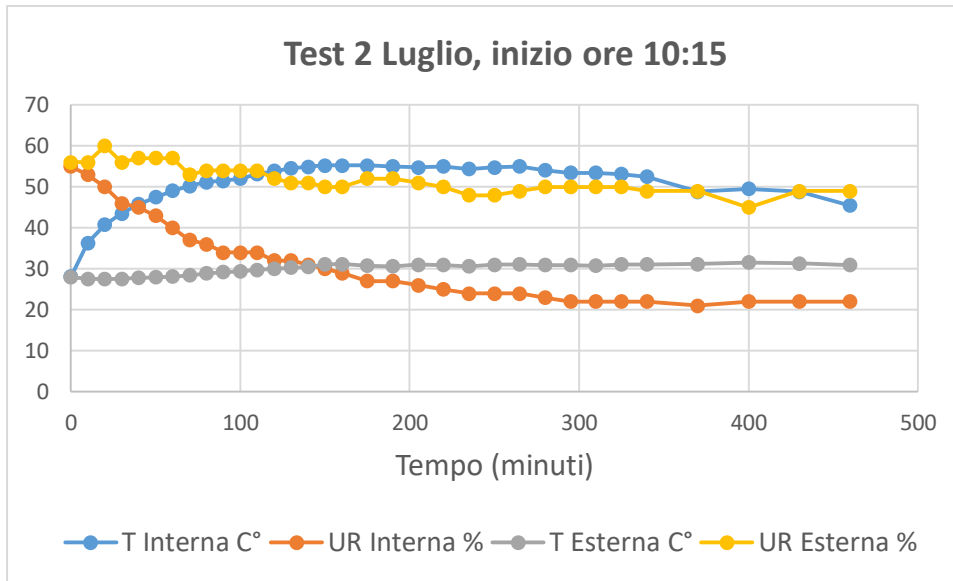


**Figura 4-3: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious**

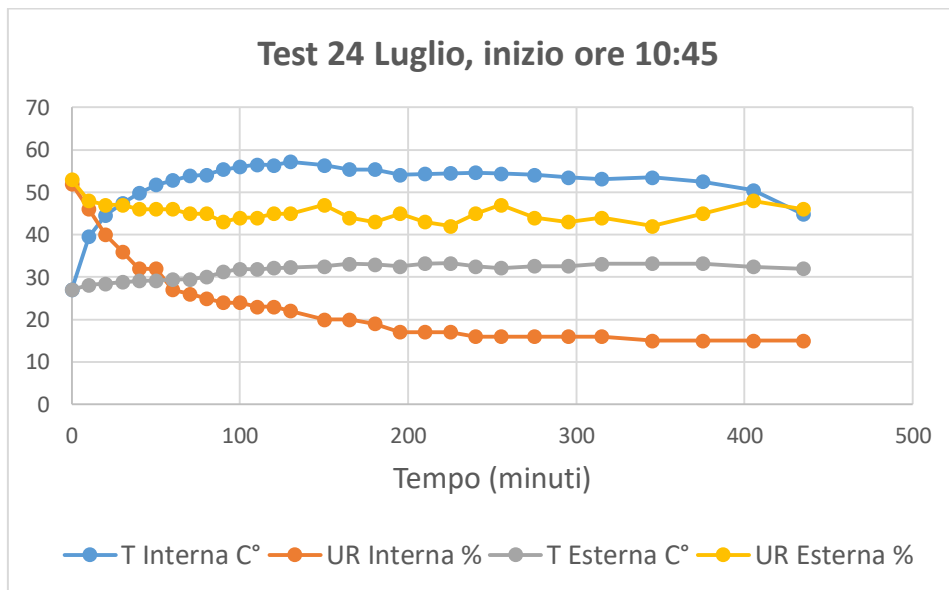
Il 25 giugno è stata una giornata molto umida, l'umidità media era del 60% con picchi che hanno raggiunto il 67% (figura 4-3). Sono stati essiccati otto campioni dal peso compreso tra i 20 e i 35 g. L'elevata UR esterna e il peso dei campioni hanno influito negativamente sull'esecuzione dell'essiccamento, otto ore non sono state sufficienti e l'UR interna dei prodotti ha raggiunto soltanto il 30% (figura 4-3) al termine del processo.

Campione Tal Quale (in g)	Dopo Essiccamento (8 h)	% UR rimossa dopo Essiccamento
25,66	10,17	60,36
32,43	16,67	48,59
23,16	8,77	62,13
31,02	16,79	45,87
20,78	8,49	59,14
34,89	18,41	47,23
35,64	19,91	44,13
37,69	23,36	38,02

**Tabella 4-3: Risultati test 25 giugno, Varietà Golden Delicious**



**Figura 4-4: Andamento T e UR, Varietà Granny Smith**



**Figura 4-5: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious**

Nei test di Luglio si è deciso di ridurre lo spessore dei campioni poiché l'eccessivo peso non consentiva un essiccamento adeguato durante la giornata. Le mele sono state affettate ottenendo diversi campioni dal peso compreso tra i 15 e i 25 g e con uno spessore tra i 5 e i 6 mm. Il 2 luglio sono state essiccate due mele Granny Smith, l'UR interna finale è stata del 22% (*figura 4-4*) in una giornata relativamente umida, soprattutto tra le 10 e le 13. Il 24 luglio il test è stato decisamente più efficiente, l'umidità esterna è stata tra il 40 e il 45% e i campioni hanno raggiunto un contenuto idrico del 15% alla fine del processo (*figura 4-5*).

Si può confermare che l'umidità esterna e la pezzatura sono fattori che influiscono fortemente sull'efficienza e la velocità del processo di essiccamento solare.

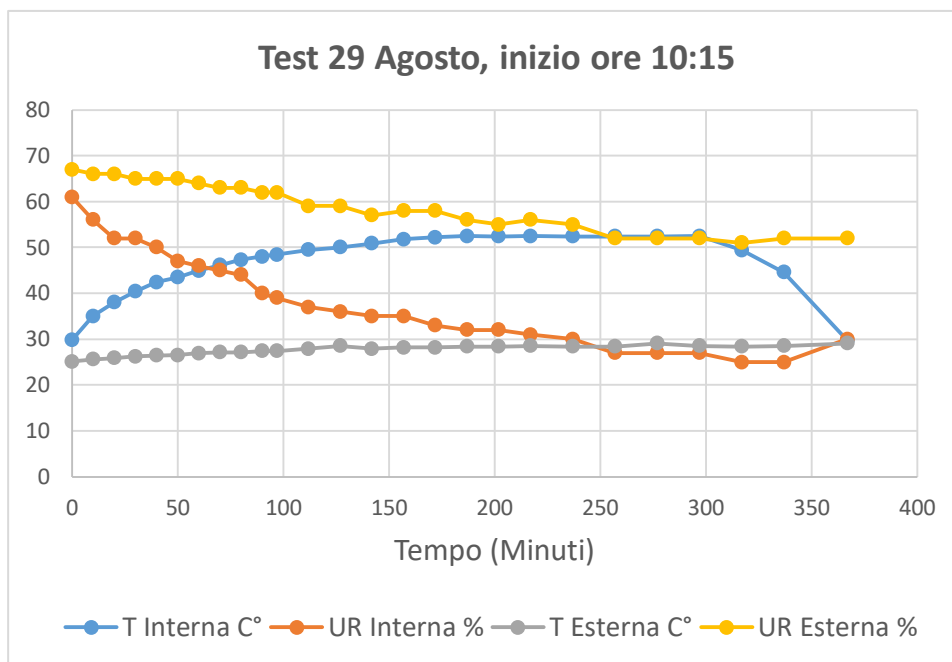
<b>Campione Tal Quale (in g)</b>	<b>Dopo Essiccamento (8h)</b>	<b>% UR rimossa dopo Essiccamento</b>
26,26	9,6	63,44
25,83	9,63	62,71
26,52	11,57	56,37
18,44	6,1	66,91
33,04	17	48,54
23,32	7,35	68,48
17,54	3,7	78,9
25,79	10,6	58,89

**Tabella 4-4: Risultati test 2 luglio, Varietà Granny Smith**

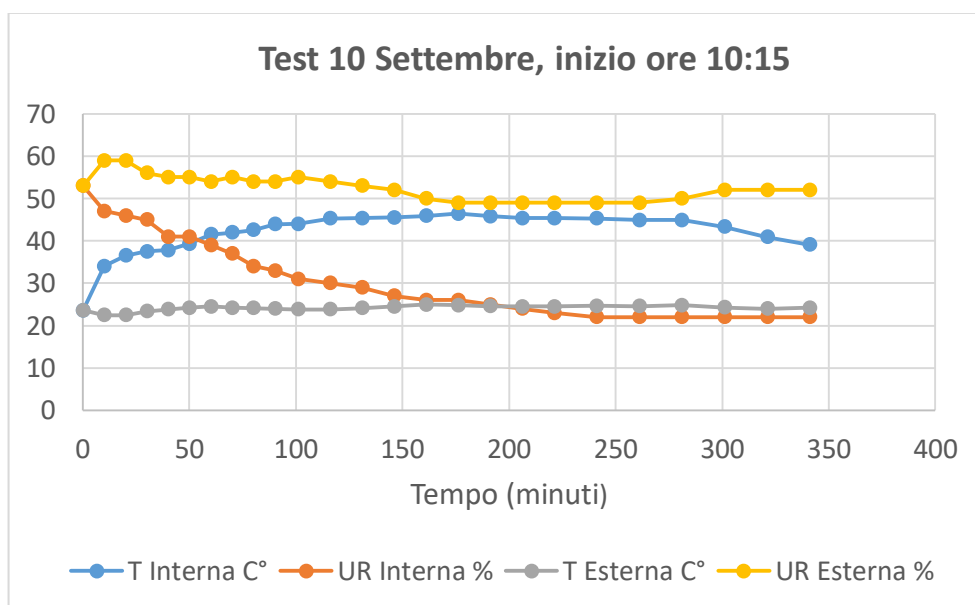


<b>Campione Tal Quale (in g)</b>	<b>Dopo Essiccamento (8h)</b>	<b>% UR rimossa Dopo Essiccamento</b>
22,64	5,34	76,41
21,19	6,54	69,1
18,93	4,53	76,06
26,28	10,11	61,52
18,26	4,64	74,58

*Tabella 4-5: Risultati test 24 luglio, Varietà Golden Delicious*



**Figura 4-6: Andamento T e UR, Varietà Granny Smith**



**Figura 4-7: Andamento T e UR, Varietà Golden Delicious**

Il 29 Agosto sono state essiccate due mele Granny Smith. Questa volta il processo è stato più breve del solito a causa dell'annuvolamento nel pomeriggio. Si può osservare nella *Figura 4-6* un calo netto della temperatura interna che passa da 52 a 29 C° arrestando il processo di essiccamento. In assenza di luce i campioni tendono a riacquisire umidità, la quale passa dal 25 al 30% (*figura 4-6*). L'ultimo test è stato il 10 settembre, in questa occasione si è deciso di coprire i fori presenti sul lato posteriore dell'essiccatore con del nastro adesivo, dimezzandoli da 64 a 32. Questa prova si è conclusa alle 16, due ore prima rispetto alle prove precedenti, poiché le giornate si sono accorciate e l'assenza di luce non consentiva lo svolgimento del processo. Durante l'essiccamento i campioni hanno raggiunto il 22% di umidità (*Figura 4-7*), valore che si è poi stabilizzato per due ore fino al termine della sperimentazione.

<b>Campione Tal Quale (in g)</b>	<b>Dopo Essiccamento (8h)</b>	<b>% UR rimossa dopo Essiccamento</b>
19,78	8,04	59,35
18,09	7,24	59,97
19,19	9,04	52,89
9,92	3,02	69,55
23,52	12,77	45,7
14,95	5,87	60,73
21,14	10,05	52,45

***Tabella 4-6: Risultati test 29 agosto, Varietà Granny Smith***

<b>Campione Tal Quale (In grammi)</b>	<b>Dopo Essiccamento (6 h)</b>	<b>% UR rimossa dopo Essiccamento</b>
20,45	8,64	57,75
12,78	3,11	75,66
12,56	3,8	69,74
19,96	9,04	54,7
20,72	9,54	53,95
20,69	8,69	57,99

*Tabella 4-7: Risultati test 10 settembre Golden Delicious*

Come è stato detto nel Capitolo 2 il Moisture Ratio è un parametro molto importante nel valutare l'efficacia dell'essiccamento. In questa sperimentazione sono stati calcolati i moisture ratio dei migliori tre test di essiccamento solare.

<b>Giorno Test</b>	<b>Moisture Ratio</b>	<b>Varietà</b>
<b>13-giu</b>	0,29	Golden Delicious
<b>24-lug</b>	0,5	Golden Delicious
<b>29-ago</b>	0,26	Granny Smith

*Tabella 4-8: Risultati moisture ratio*

“Il Moisture Ratio MR varia tra  $MR=1$ , all'inizio del processo di essiccamento, e  $MR=0$  una volta che il campione è essiccato e in equilibrio con l'ambiente”<sup>9</sup>. I dati della *tabella 4-8* sono stati confrontati con i valori di MR ottenuti da Mustafa et al<sup>8</sup> e sono risultati simili.

## CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi ha confermato come i parametri che incidono sull'andamento dell'essiccazione solare siano la pezzatura dei campioni, l'umidità relativa e la temperatura dell'aria. Con il semplice sistema testato, in presenza di giornate molto umide, il processo è stato più lento e le otto ore di funzionamento non sono state sufficienti a essiccare il prodotto fino ad un valore accettabile da un punto di vista tecnico. Inoltre, la circolazione naturale dell'aria all'interno dell'essiccatore, non essendo controllata, influisce in modo importante sulle prestazioni dello stesso. Ciò nonostante, nelle giornate climaticamente più favorevoli è stato possibile raggiungere valori di umidità di prodotto vicini a quelli ottenibili mediante sistemi solari ben più complessi. In considerazione di questo è possibile quindi ipotizzare il semplice utilizzo di una ventola per orientare l'aria in direzione dei campioni e poter aumentare e controllare anche la convezione e il trasferimento di massa, accelerando e gestendo al meglio il processo anche in giornate meno favorevoli. Si evidenzia quindi come, anche nelle nostre condizioni climatiche estive, l'uso di semplici essiccatori solari possa essere considerato un metodo tecnicamente valido per essiccare le mele.

## BIBLIOGRAFIA

- Enciclopedia Treccani
  - www.Foodscovery.it
  - sito.entecra.it “Linee Guida per l’essiccamento su piccola scala. L’impiego degli essiccatori solari per piccole produzioni vegetali” Marcello della Campa, Roberto Lo Scalzo, Tiziana M.P. Cattaneo, Giovanni Marino, Claudio Menegatti
  - www.acqualab.com
  - www.Italiafruit.net
  - www.chimica-online.it
  - www.greenme.it
1. Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S. & Saidur, R. Performance study of different solar dryers: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **34**, 463–470 (2014).
  2. Tiwari, G. . & Jain, N. Thermal aspects of open sun drying of various crops. *Energy* **28**, 37–54 (2003).
  3. Zomorodian, A. A. & Dadashzadeh, M. Indirect and mixed mode solar drying mathematical models for sultana grape. *J. Agric. Sci. Technol.* (2009).
  4. Al-Juamily, K. E. J., Khalifa, A. J. N. & Yassen, T. A. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. *Desalination* (2007). doi:10.1016/j.desal.2007.04.026
  5. Goyal, R. K. & Tiwari, G. N. Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: A new concept. *Sol. Energy* (1997). doi:10.1016/S0038-092X(96)00144-2
  6. Sharma, V. K., Colangelo, A. & Spagna, G. Experimental performance of an indirect type solar fruit and vegetable dryer. *Energy Convers. Manag.* (1993). doi:10.1016/0196-8904(93)90114-P

7. El-Sebaei, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I. & El-Gohary, H. G. Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Convers. Manag.* **43**, 2251–2266 (2002).
8. Aktaş, M., Ceylan, I. & Yilmaz, S. Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer. *Desalination* **239**, 266–275 (2009).
9. Blanco-Cano, L., Soria-Verdugo, A., Garcia-Gutierrez, L. M. & Ruiz-Rivas, U. Modeling the thin-layer drying process of Granny Smith apples: Application in an indirect solar dryer. *Appl. Therm. Eng.* **108**, 1086–1094 (2016).
10. Meisami-asl, E. & Rafiee, E. Mathematical Modeling of Kinetics of Thin-layer Drying of Apple (var. Golab)&quot;. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Agric. Eng. Int. CIGR Ejournal* **11**, 1–10 (2009).
11. Fudholi, A. *et al.* Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **51**, 1191–1204 (2015).
12. N, A. K. E. L. İ. Ç. İ. Güneş enerjili tünel tipi kurutucu ile elman ın kuruma davranış lar ın ın belirlenmesi için bir deneysel çalış ma An Experimental Study for Solar Tunnel Drying of Apple. (2005).
13. Kaya, A., Aydın, O. & Demirtaş, C. Drying Kinetics of Red Delicious Apple. *Biosyst. Eng.* **96**, 517–524 (2007).
14. Sacilik, K. & Elicin, A. K. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *J. Food Eng.* **73**, 281–289 (2006).