



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI E
AMBIENTE

Corso in Scienze e Tecnologie Alimentari

La tecnologia di estrusione per la produzione di proteine vegetali testurizzate nei prodotti plant-based

Relatore

Prof. Lorenzo Guerrini

Correlatore

Mathew Cedeño Avellán

Laureanda

Alice Antonini

N° matricola 2000022

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

INDICE

INDICE	1
RIASSUNTO	5
ABSTRACT	6
CAPITOLO 1. Le proteine vegetali testurizzate	9
1.1 Le materie prime: soia, grano e pisello	13
1.2 Cosa e quali sono le TVP	18
CAPITOLO 2. La tecnologia di estrusione	23
2.1 La definizione di estrusione	23
2.2 Gli estrusori	25
2.3 Modificazioni durante l'estrusione	29
CAPITOLO 3. Shear Cell Technology ed elettrofilatura	35
3.1 La Shear Cell Technology	35
3.2 L'elettrofilatura	37
CAPITOLO 4. Conclusioni	41
BIBLIOGRAFIA	46
SITOGRAFIA	50

RIASSUNTO

I prodotti a base di proteine vegetali (plant-based) si stanno diffondendo sempre di più sul mercato per soddisfare la maggior domanda dei consumatori. L'aumento della richiesta è dettato principalmente dalla crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale. La gran parte di questi prodotti mira a diventare una valida alternativa a quelli di origine animale, tra tutti la carne, in quanto responsabili di alcuni effetti negativi sull'ambiente. Per cercare di vincere questa sfida, la ricerca è in continua evoluzione per cercare le più efficienti tecniche di produzione. Questa tesi intende approfondire la tecnologia di estrusione per la produzione di proteine vegetali testurizzate (TVP), il principale ingrediente dei prodotti proteici plant-based. Le materie prime prese in considerazione per la realizzazione delle TVP sono principalmente la soia, il grano e il pisello. Oltre a queste si accenna alla rivalutazione di alcuni sottoprodotti dell'industria alimentare per estrarne altre frazioni proteiche utili alla formulazione dei prodotti vegetali. Analizzando le due differenti tipologie di TVP, quali le TVP a bassa idratazione (low-moisture TVP, LM-TVP) e le TVP ad alta idratazione (high-moisture TVP, HM-TVP), si parlerà delle due modalità di estrusione necessarie per il loro ottenimento. Dal momento che la qualità delle due tipologie di TVP è influenzata da diversi parametri di processo, sono analizzati gli effetti di temperatura, umidità, velocità della vite e di alimentazione dell'estrusore. Oltre a ciò verranno affrontate le tecniche alternative di Shear Cell Technology ed elettrofilatura, evidenziandone le differenze. L'obiettivo della tesi è illustrare alcune modalità di produzione di alimenti proteici plant-based e capire quali siano i punti critici dei processi che devono essere migliorati. In questo modo sarà possibile ottenere dei prodotti appetibili che vengano scelti dai consumatori per differenziare la propria dieta e renderla più sostenibile.

ABSTRACT

The plant-based protein products are increasingly spreading in the market to meet the growing demand from consumers. The rise in demand is primarily driven by the increasing focus on environmental sustainability. Most of these products aim to become a viable alternative to animal-based ones, especially meat, as they are responsible for some negative environmental effects. To tackle this challenge, research is continuously evolving to find the most efficient production techniques. This thesis aims to delve into the extrusion technology for the production of texturized plant-based proteins (TVP), the main ingredient in plant-based protein products. The raw materials considered for TVP production are mainly soy, wheat, and peas. In addition to these, there is a mention of the reevaluation of some by-products of the food industry to extract other useful protein fractions for formulating plant-based products. Analyzing the two different types of TVP, namely low-moisture TVP (LM-TVP) and high-moisture TVP (HM-TVP), the two extrusion methods required for their obtainment will be discussed. Since the quality of the two types of TVP is influenced by various process parameters, the effects of temperature, humidity, screw speed, and extruder feeding are analyzed. Additionally, alternative techniques such as Shear Cell Technology and electrospinning will be addressed, highlighting their differences. The thesis aims to illustrate some methods of producing plant-based protein foods and understand the critical points of the processes that need improvement. This way, it will be possible to obtain appealing products chosen by consumers to diversify their diet and make it more sustainable.

CAPITOLO 1.

Le proteine vegetali testurizzate

Oggi i prodotti plant-based sono diventati una proposta sempre più presente nell'ambito alimentare. Nella mappa (1) si illustra la distribuzione geografica mondiale delle compagnie che lavorano alla formulazione di nuovi prodotti vegetali. I centri focali sono gli Stati Uniti e il nord Europa [1]. La lista delle compagnie è stata estrapolata dal database della compagnia Good Food Institute, un istituto di ricerca internazionale interessato allo sviluppo di fonti proteiche vegetali. Come emerge dai loro report, sia aziende emergenti sia aziende tradizionali che ampliano le loro proposte stanno investendo nel settore plant-based. Questi investimenti hanno raggiunto nel 2022 un valore di 1.2 miliardi di dollari, rappresentanti il 15% di tutti gli investimenti compiuti finora. Una cifra simile è stata raggiunta anche nel 2021 [18]. Nel periodo 1997-2022 il totale degli investimenti è di 7.8 miliardi di dollari [19]. Globalmente dal 2015 sono già stati lanciati sul mercato 6485 nuovi prodotti plant-based [11].



Mappa (1): distribuzione geografica delle compagnie produttrici di prodotti plant-based.
Immagine tratta da [1]

Lo scopo della produzione di tali alimenti vegetali è cercare di diminuire il consumo dei prodotti di origine animale nelle diete di una popolazione mondiale in continua crescita, fornendo delle alternative che abbiano un'elevata percentuale proteica [9]. Si stima che entro il 2050 la popolazione mondiale raggiungerà i 9.8 miliardi di persone e sarà quindi necessario progettare un sistema alimentare globale che sia il più sostenibile possibile [6, 14]. In particolare si vuole cercare di ridurre la quantità consumata di carne, alimento che ancor'oggi occupa un importante ruolo nella dieta di molte persone. La domanda globale di carne è prevista raggiungere i 455 milioni di tonnellate entro il 2050 con un aumento del 76% rispetto al 2005 [1, 8, 9]. Essa infatti è riconosciuta positivamente come una fonte proteica di alta qualità grazie alle sue proprietà nutrizionali e sensoriali, quali soprattutto consistenza, sapore e profilo amminoacidico [10]. Allo stesso tempo però alcune problematiche ambientali come le emissioni di gas serra, l'utilizzo del suolo e di acqua, l'eutrofizzazione e l'energia consumata legate all'allevamento di animali e specialmente a quello di bovini, hanno portato a ridurre il consumo. La Fig. (1) riporta un grafico che analizza alcuni degli aspetti

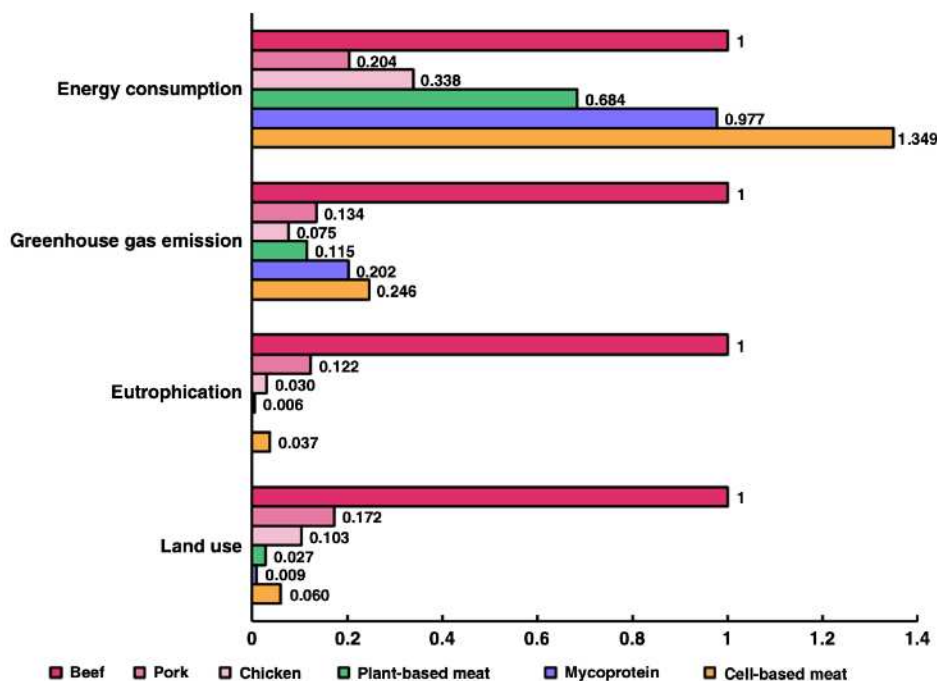


Fig. (1): confronto tra l'impatto ambientale della carne e delle alternative vegetali alla carne. Immagine tratta da [1]

contribuenti all’impatto ambientale sopra citati, paragonando la carne e le alternative vegetali alla carne. Di interesse per questa tesi è il confronto tra la carne bovina, di maiale e di pollo e le alternative plant-based. I dati sono normalizzati rispetto alla carne bovina. Le informazioni relative ai prodotti plant-based sono state ottenute tramite il Life Cycle Assessment (LCA) di Beyond Meat® e Impossible™ Beef del 2015. I dati per la carne bovina, di maiale e di pollo sono stati adattati da un'analisi LCA del 2015. Il potenziale di eutrofizzazione e l’utilizzo del suolo per i prodotti vegetali sono previsti essere significativamente inferiori rispetto alle metriche riportate per la carne di origine animale, mentre le emissioni di gas serra si collocano tra le metriche per la carne di maiale e di pollo e il consumo di energia supera quello del maiale e del pollo. In tutte e quattro le categorie però gli alimenti plant-based risultano avere un minor impatto rispetto alla carne bovina [1].

La Fig. (2) illustra le emissioni di gas serra derivanti dalla produzione di diversi tipi di alimenti nel periodo 2005-2007 e le previsioni per il 2050. Gli alimenti di origine animale, specialmente la carne rossa, sono la principale fonte di emissioni di GHG legate al sistema alimentare e la loro importanza relativa è probabile che aumenti in futuro [2].

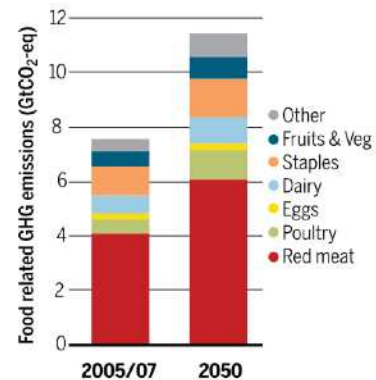


Fig. (2): carne ed emissioni di gas serra. Immagine tratta da [2]

Tra i consumatori stanno nascendo due tendenze differenti: da una parte i Paesi a basso/medio reddito stanno incrementando la loro richiesta di carne per i benefici nutrizionali; dall'altra alcuni Paesi ad alto reddito ne stanno diminuendo la domanda per le preoccupazioni ambientali ed altri invece la mantengono stabile [1, 2]. La Fig. (3) riporta il consumo totale di carne in milioni di tonnellate metriche in alcuni Stati a livello globale. I dati si basano su indagini FAO [2].

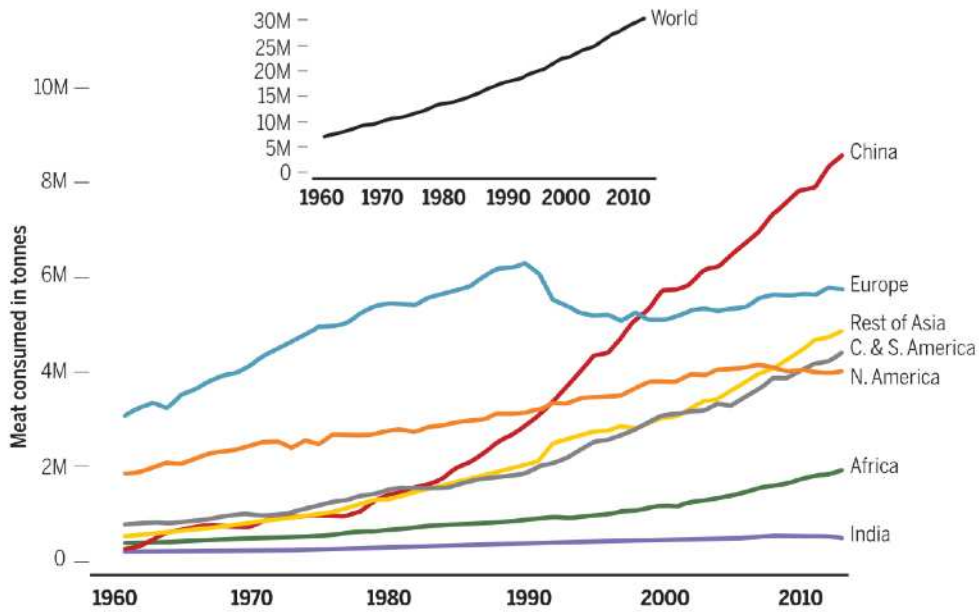


Fig. (3): consumo totale di carne in milioni di tonnellate metriche nei diversi Stati a livello globale. Immagine tratta da [2]

Una delle sfide principali delle alternative alla carne a base vegetale è quella di generare prodotti con strutture fibrose che imitano il tessuto muscolare, insieme ad altre caratteristiche come succosità, tenerezza e sapore carnoso, per soddisfare le aspettative dei consumatori [9]. Molti di questi prodotti è realizzato con le proteine vegetali testurizzate (TVP).

L'obiettivo di questa tesi è illustrare che cosa siano le TVP e analizzarne alcune possibili tecnologie di produzione, quali l'estrusione e successivamente la Shear Cell Technology (SCT) e l'elettrofilatura. Come sarà meglio analizzato nei prossimi capitoli, l'estrusione è un processo a più fasi, in cui la proteina viene lavorata in condizioni di bassa o elevata umidità per formare una struttura fibrosa a rete, generalmente attraverso i passaggi di denaturazione, aggregazione, reticolazione e separazione di fase; la SCT è una tecnologia usata per la realizzazione di materiali polimerici che sfrutta campi di flusso di taglio ben definiti grazie alla presenza di una piastra rotante e di un cono fisso; l'elettrofilatura invece è un processo finalizzato alla produzione di fibre sottili da assemblare tra loro con l'impiego di forze elettrostatiche. Nonostante la presenza di molti studi e l'uso diffuso nell'industria dell'estrusione e delle altre tecniche

citare, sono ancora molte le critiche mosse ai prodotti plant-based alternativi alla carne. Queste riguardano soprattutto il gusto, la consistenza e il diverso profilo amminoacidico tra i prodotti di origine vegetale e animale. Questi ultimi vengono giudicati migliori in quanto in un unico prodotto alimentare conferiscono tutti gli amminoacidi essenziali nelle corrette quantità [18]. Per risolvere le critiche sensoriali è importante studiare a fondo i meccanismi tecnologici da controllare per migliorare la qualità e le caratteristiche della proposta finale. Per quanto riguarda il profilo nutrizionale i prodotti proteici plant-based forniscono in grammi un contenuto totale di proteine uguale a quello dei loro analoghi animali [1]. Tuttavia, per provvedere anche ad un profilo amminoacidico bilanciato, è necessario che essi vengano inseriti all'interno di una dieta varia ed equilibrata, che comprenda il consumo di diverse fonti di alimenti vegetali. Questi, combinati tra loro, possono fornire il completo corredo degli amminoacidi essenziali [16]. In questo modo sarà allora possibile incoraggiare anche i consumatori più scettici ad ampliare e diversificare la propria dieta in un'ottica di migliore sostenibilità ambientale.

1.1 Le materie prime: soia, grano e pisello

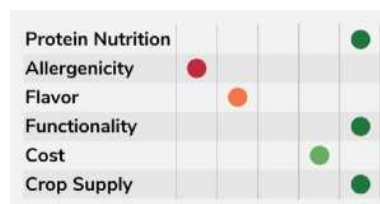
Le materie prime maggiormente utilizzate per i prodotti in commercio sono la soia, il frumento e il pisello [1, 4, 7, 9, 17]. Le proteine possono essere estratte anche da altri vegetali come il riso, il mais, i semi di girasole e di colza [7, 9, 17]. Nella tabella (1) sono riportate le diverse fonti (protein) con i relativi parametri di confronto. In riferimento alla tabella (1) la scelta della materia prima, da cui viene estratta la frazione proteica, dipende principalmente dalla concentrazione di proteine (protein concentration), dalla disponibilità (commercial stage e global crop volume), dal costo (cost kg/protein), dalle proprietà funzionali (functionality), dai valori nutrizionali (PDCAAS), dal rischio di allergie (allergen risk) e dal gusto (flavor) [17].

	Protein Concentration	PDCAAS	Allergen Risk	Commercial Stage	Flavor	Functionality	Cost (/kg protein)	Global Crop Volume (MMT)
● Excellent	>30%	>0.8	Usually mild, low pop.	Commodity	Flavorless	Low conc. effect	<\$2	>100
● Good	20-30%	0.6-0.79	‡	Large	‡	‡	\$2-4	10-99
● OK	10-20%	0.40-0.59	‡	Small	Acceptable	‡	\$5-9	1-9
● Low	5-10%	0.20-0.39	‡	Start-up	‡	‡	\$10-19	0.1-0.9
● Poor	<5%	<0.20	Severe in sig. pop.	R&D	Objectionable	Water Insoluble	>\$20	<0.1

Protein	Protein Concentration	PDCAAS	Allergen Risk	Commercial Stage	Flavor	Functionality	Cost (/kg protein)	Global Crop Volume (MMT)
Soy	●	●	●	●	●	●	●	●
Pea	●	●	●	●	●	●	●	●
Wheat	●	●	●	●	●	●	●	●
Canola	●	●	●	●	●	●	●	●
Chickpea	●	●	●	●	●	●	●	●
Fava Bean	●	●	●	●	●	●	●	●
Lentil	●	●	●	●	●	●	●	●
Lupin	●	●	●	●	●	●	●	●
Mung Bean	●	●	●	●	●	●	●	●
Navy Bean	●	●	●	●	●	●	●	●
Peanut	●	●	●	●	●	●	●	●
Sunflower	●	●	●	●	●	●	●	●
Almond	●	●	●	●	●	●	●	●
Corn	●	●	●	●	●	●	●	●
Oat	●	●	●	●	●	●	●	●
Potato	●	●	●	●	●	●	●	●
Quinoa	●	●	●	●	●	●	●	●
Rice	●	●	●	●	●	●	●	●
Sorghum	●	●	●	●	●	●	●	●

Tabella (1): le materie prime vegetali in confronto. Immagine tratta da [17]

La soia attualmente, secondo i dati della FAO, viene prodotta principalmente negli Stati Uniti, in Brasile e in Argentina per un totale di 348.7 milioni di tonnellate. Il 77% della soia globalmente prodotta è destinata ad essere mangime per l'allevamento di animali da carne e



Caratteristiche della soia. Immagine tratta da [17]

per il settore lattiero-caseario. Il 7% viene utilizzato direttamente per il consumo umano per prodotti come bevande vegetali, edamame, tempeh o tofu. La restante parte (16%) viene usata per ottenere biocarburanti o oli vegetali. Dall'estrazione dell'olio dai semi di soia si ottengono come sottoprodotto le proteine della soia [9]. Un diagramma di flusso per la produzione di ingredienti proteici di soia è illustrato nel grafico (a) [16]. In particolare si possono avere farine degrassate (soy flour) con un contenuto proteico del 50-55%, concentrati proteici (soy protein concentrate) con un contenuto del 65-70% o isolati proteici (soy protein isolate)

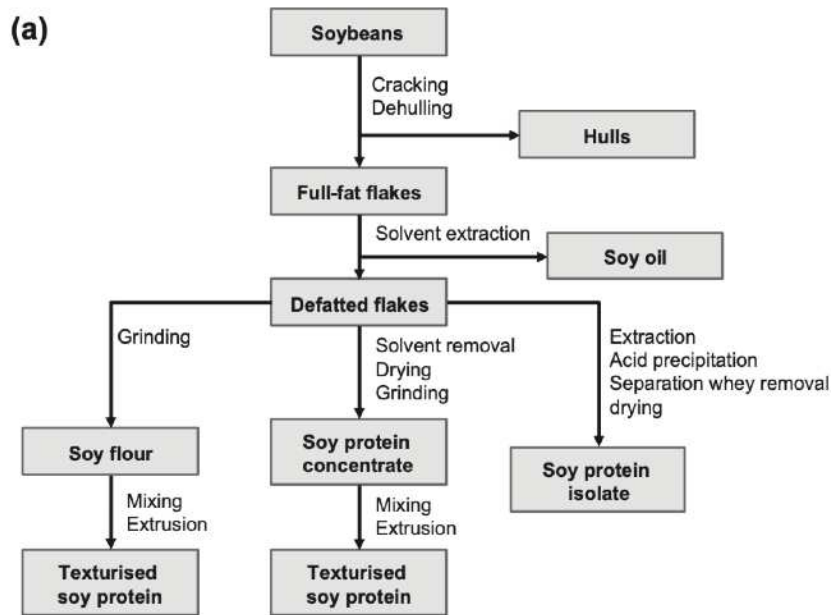


Grafico (a): flusso di processo per l'estrazione di prodotti proteici di soia.
Immagine tratta da [16]

con l'85-90% di frazione proteica [7, 9]. Nei concentrati di soia la quota di carboidrati e fibre è minore rispetto a quella contenuta nella farina e così anche per gli isolati rispetto ai concentrati. Farine, concentrati e isolati hanno quindi un'elevata percentuale proteica e una bassa percentuale di grassi, carboidrati e fibre. Le proteine di soia hanno molti vantaggi come la facile disponibilità commerciale, il costo contenuto, le buone funzionalità tecnologiche e il profilo amminoacidico bilanciato [4, 9]. Nella tabella (1) si nota che la soia è composta per più del 30% di proteine, una delle percentuali più alte. È per i vantaggi sopra citati che la maggior parte dei prodotti proteici plant-based in commercio ha come principale ingrediente la soia [4]. Tuttavia a causa dell'allergenicità di alcune proteine, del gusto e della possibile produzione OGM da qualche tempo si stanno cercando delle alternative alla soia [4, 9].

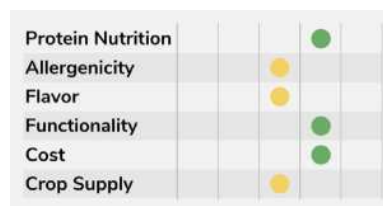
Il grano è un'altra abbondante fonte di proteine vegetali con una produzione mondiale di 735.18 milioni di tonnellate, coltivate soprattutto in Cina, India, Russia e Stati Uniti. Il grano contiene il

Protein Nutrition		●		
Allergenicity	●			
Flavor		●		
Functionality				●
Cost				●
Crop Supply				●

Caratteristiche del grano.
Immagine tratta da [17]

10-20% di proteine a seconda della varietà, come illustrato nella tabella (1). La frazione proteica del grano, il glutine, è composto principalmente da glutenina e gliadina. Si ottiene per l'80% come sottoprodotto della filiera dell'estrazione dell'amido dalla lavorazione in umido della farina [9]. Grazie alla capacità del glutine di formare una massa insolubile è possibile avere la separazione della frazione proteica dall'amido tramite un semplice passaggio di lavaggio con acqua [16]. Il glutine viene utilizzato soprattutto per le sue proprietà viscoelastiche e può essere mescolato con altre fonti vegetali proteiche come soia, arachidi e pisello per incrementarne la struttura fibrosa dei prodotti. Tuttavia a causa delle sempre più frequenti intolleranze e allergie al glutine questo ingrediente viene sostituito per ottenere prodotti gluten-free [4, 9, 16].

Una valida alternativa è rappresentata allora dalle proteine del pisello. Il pisello è uno dei legumi più coltivati al mondo, con una produzione di 13.54 milioni di tonnellate, specialmente in Canada, Russia e Cina. Come si vede nella tabella (1), ha una percentuale proteica del



Caratteristiche del pisello.
Immagine tratta da [17]

20-30%. Gli isolati proteici di pisello hanno un contenuto di proteine dell'80-85% con buoni vantaggi in termini di costi, alta biodisponibilità nutrizionale e basso potenziale allergico. Recentemente le proteine di pisello hanno quindi attirato molta attenzione nei prodotti plant-based. Gli aspetti negativi riguardano l'elevata attenzione da porre ai parametri tecnologici per ottenere un'adeguata struttura fibrosa e l'off-flavor di legume presente nel prodotto finito [4, 9].

Oltre a queste più comuni materie prime si trovano anche alternative proteiche a base di riso e mais. Il riso ha una percentuale proteica del 5-10%, tra le più basse (tabella 1). Tuttavia è una delle principali modalità di approvvigionamento di proteine nei Paesi asiatici. Una delle



Caratteristiche del riso.
Immagine tratta da [17]

applicazioni maggiori nell'industria alimentare dei cibi a base di farina di riso è quella dei formulati prodotti per persone intolleranti al glutine data la sua ipoallegernicità. Il mais invece ha una percentuale proteica del 10-20% dalla tabella (1). La proteina più abbondante nel mais è la zeina, una delle poche proteine vegetali che, come si vedrà nel capitolo terzo, è stata elettrofilata. La zeina è infatti utilizzata soprattutto come materiale polimerico [9].



Caratteristiche del mais.
Immagine tratta da [17]

Altre fonti minori sono i semi di colza e di girasole. Entrambe le colture vengono utilizzate per l'estrazione di olio. Dai sottoprodotti della lavorazione dell'olio si può estrarre una buona frazione proteica, che può essere utilizzata per la realizzazione di alimenti plant-based. Le proteine ottenibili dalla colza, se estratte correttamente in modo tale da eliminare eventuali fattori anti-nutrizionali, contengono un profilo di aminoacidi ben bilanciato. Queste fonti proteiche possono essere utilizzate in combinazione con quelle più comunemente usate, come il pisello o la soia, per ottenere un risultato migliore [9].



Caratteristiche del girasole.
Immagine tratta da [17]



Caratteristiche della colza.
Immagine tratta da [17]

È importante osservare che l'ottenimento delle proteine per la formulazione di prodotti proteici vegetali avviene spesso tramite la rivalutazione degli scarti di altre filiere alimentari. Infatti una delle tante sfide nella realizzazione di nuovi prodotti a base di proteine vegetali è quella di partire da materie prime già esistenti nell'industria per avere prodotti di qualità senza dover aumentare significativamente l'impatto agricolo.

1.2 Cosa e quali sono le TVP

Le proteine vegetali testurizzate (TVP) sono l'ingrediente principale delle ricette proteiche plant-based. Esse possono essere definite come dei prodotti alimentari costituiti principalmente da proteine di origine vegetale e acqua. Si ottengono tramite la trasformazione di un materiale vegetale proteico in polvere in materiale vegetale proteico strutturato [4]. Oltre all'acqua è possibile trovare altri ingredienti opzionali con scopi nutrizionali o tecnologici come grassi, amidi, spezie e aromi, o altri additivi alimentari. La polvere proteica di partenza si ottiene da una farina, un concentrato o un isolato. Tecnicamente esistono due tipologie di TVP: le TVP a bassa idratazione e le TVP ad alta idratazione [4, 6].

Le TVP a bassa idratazione (low-moisture TVP, LM-TVP) vengono commercializzate essiccate e ne è consigliata la reidratazione prima del consumo (Fig. 4). Data la loro struttura porosa, con l'idratazione ottengono una consistenza morbida e spugnosa [4, 7]. Sono in grado di assorbire acqua fino a raddoppiare o triplicare il loro peso [7]. La reidratazione delle LM-TVP può avvenire in acqua bollente o in acqua fredda. In acqua calda il processo impiega significativamente meno tempo rispetto all'acqua fredda; a parità di temperatura dell'acqua la velocità di reidratazione dipende dalle dimensioni del prodotto: per bocconcini di 1-2 centimetri sono necessari 15-20 minuti, mentre per fette più grandi (5-7 centimetri) anche un'ora. L'acqua può essere utilizzata al naturale o miscelata con aromi e condimenti, come un brodo vegetale, per conferire maggiore sapore al prodotto. Possono eventualmente anche essere consumate secche come snack croccanti o come ingredienti di piatti freddi. Infatti le forme con cui vengono commercializzate le TVP a bassa idratazione sono svariate: bocconcini, granulari di diverse dimensioni (1-2 mm o 2-4 mm), scaglie o fette [4, 7]. Le LM-TVP, al di fuori dei prodotti plant-based, sono spesso utilizzate come diluenti della carne nei prodotti a base di carne lavorata, come salsicce e polpette di manzo, per migliorare la loro capacità di trattenere l'acqua [4]. Si è detto che per ottenere le TVP si utilizza la tecnologia di estrusione. Tra gli alimenti ottenuti tramite

l'estrusione i più comuni sono quelli prodotti per l'industria degli snack, come i diversi tipi di cornflakes e di muesli. Questi, a differenza delle TVP, sono realizzati con farine di cereali con un alto contenuto di amido, ma mostrano caratteristiche molto simili alle LM-TVP come la leggerezza, la croccantezza o la consistenza ariosa [4]. Le proteine vegetali testurizzate a bassa umidità vengono ottenute con un estrusore a doppia vite. La quantità di acqua che viene miscelata con la polvere proteica rappresenta una quota del 20-40% [4]. La massa proteica viene tagliata all'uscita della sezione dello stampo con un coltello nella dimensione e nella forma desiderata [5]. Dopo l'estrusione le LM-TVP vengono essiccate fino ad ottenere il 12% di umidità relativa, raffreddate e imballate per lo stoccaggio [4]. Essendo prodotti secchi con un basso tenore di umidità relativa si trovano in commercio a temperatura ambiente. La tecnologia di estrusione a bassa umidità presenta gli svantaggi di un elevato apporto energetico, scarico di rifiuti, bassa efficienza e prodotti testurizzati di qualità inferiore a quelli ad alta umidità [9]. Infatti dal punto di vista della consistenza e della struttura le LM-TVP vengono criticate per la loro lontananza dal muscolo animale intero a causa della texture spugnosa che guadagnano in seguito alla reidratazione. Come si spiegherà meglio nel secondo capitolo, l'estrusione a bassa umidità a fine processo comporta l'evaporazione dell'acqua presente nella massa viscosa, la quale si espande. Questo è ciò che conferisce l'aspetto arioso e gonfio dei bocconcini. Nonostante quindi il gusto possa essere positivamente accettato dai consumatori, la consistenza particolare allontana il prodotto vegetale dall'analogo animale a cui si ispira. Pertanto, l'approccio ad alta idratazione è considerato una scelta più adatta per lo sviluppo di sostituti fibrosi a base vegetale della carne [15].

Le TVP ad alta idratazione (high-moisture TVP, HM-TVP) sono un prodotto più recente e il loro obiettivo è quello di imitare ancora meglio la struttura fibrosa del muscolo intero (Fig. 5). In genere le HM-TVP contengono più del 40% di umidità, con valori vicino al 60-70% [6, 7]. A causa dell'elevato contenuto di umidità, una volta preparato, il prodotto proteico deve essere congelato per permetterne la

conservazione e la sicurezza dal punto di vista microbiologico. L'abbassamento della temperatura rallenta la degradazione microbiologica della massa proteica vegetale. In commercio i prodotti vengono venduti al consumatore finale nel reparto refrigerato [4, 7]. Generalmente sono disponibili in pezzi per imitare la carne a cubetti o in brandelli per richiamare la carne stirata [7]. Le proteine vegetali testurizzate ad alta idratazione vengono prodotte anch'esse tramite il processo di estrusione, con un estrusore bivate relativamente lungo a cui è applicato un segmento di raffreddamento. È grazie all'applicazione della doppia vite che è possibile conferire una struttura fibrosa alla massa vegetale. Infatti le proteine vegetali nella loro forma nativa hanno una configurazione globulare e l'obiettivo dell'estrusione bivate ad alta idratazione è quello di modificare la struttura globulare proteica in una fibrosa [6]. Dopo il percorso nel cilindro con la doppia vite, la massa calda e umida viene pompata dall'estrusore attraverso una lunga trafilatura di raffreddamento dove avviene la testurizzazione. Il raffreddamento del prodotto a meno di 100°C prima dell'uscita dello stampo permette che non si verifichino l'evaporazione dell'acqua e l'espansione, ottenendo così un prodotto molto compatto: la densità delle HM-TVP è una forte differenza con le LM-TVP caratterizzate dalla struttura ariosa (Fig. 6) [7]. Evitando inoltre una notevole perdita di vapore al momento dell'estrusione, le HM-TVP possono essere insaporite con successo mescolando insieme alle proteine e all'acqua ingredienti aromatizzanti. In commercio si trovano quindi HM-TVP con gusti neutri oppure con particolari aromi [6, 7]. Tra gli ingredienti si trovano anche grassi o polisaccaridi, come amidi, fibre e metilcellulosa, con funzione addensante.

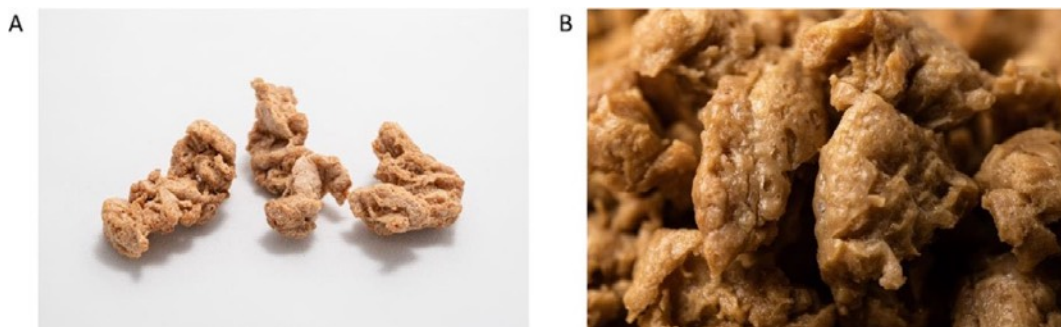


Fig. (4): proteine vegetali testurizzate a bassa idratazione. A: secche, B: idratate.
Immagine tratta da [4]

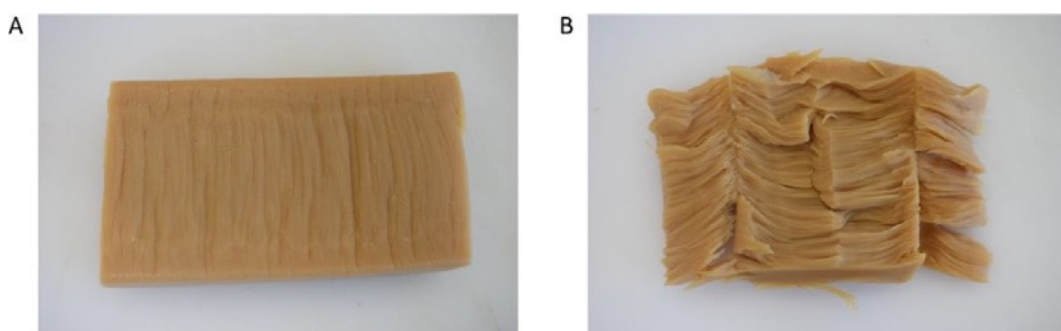


Fig. (5): proteine vegetali testurizzate ad alta idratazione. A: texture esterna, B: texture interna.
Immagine tratta da [4]

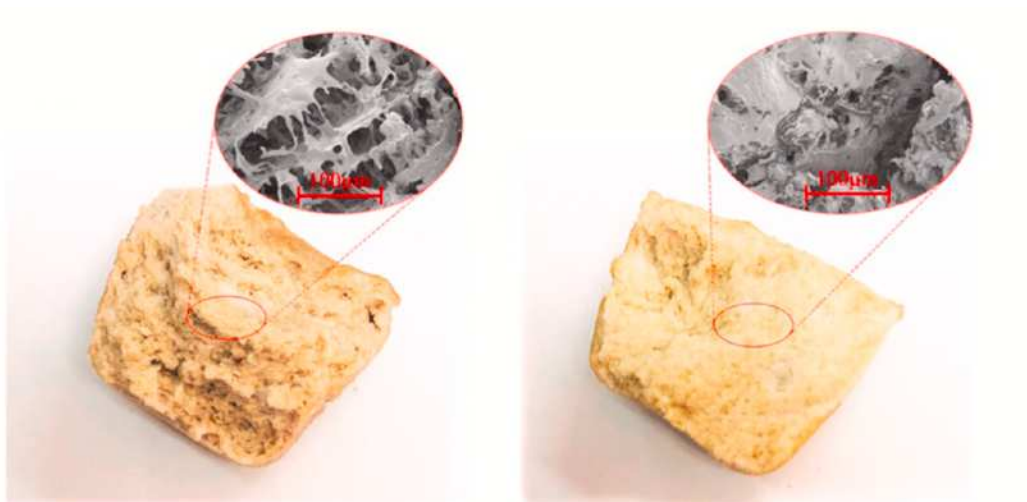


Fig. (6): microscopia elettronica a scansione (SEM) di prodotti a base di proteine del pisello a bassa idratazione (sinistra) e ad alta idratazione (destra).
Immagine tratta da [18]

CAPITOLO 2.

La tecnologia di estrusione

Mentre le farine, i concentrati e gli isolati di proteine vegetali tal quali sono venduti sotto forma di polvere, la carne ha una struttura fibrosa anisotropa unica che le conferisce le tipiche proprietà sensoriali, in particolare la sensazione del morso. I prodotti a base di carne possono essere suddivisi in pezzi interi di muscolo, carne macinata e prodotti a base di carne lavorata come ad esempio salsicce, hamburger o polpette [4]. Le tecnologie usate nella produzione delle alternative alla carne devono quindi consentire la realizzazione di alimenti che richiamino la consistenza dei tanti e diversi prodotti a base di carne [4]. Un esempio della varietà di prodotti plant-based presenti in commercio è illustrata nelle Fig. (7a-7f). È quindi necessario passare dalla polvere vegetale proteica al materiale strutturato delle proteine vegetali testurizzate.

In questo capitolo verrà trattata la tecnologia di estrusione con riferimento al funzionamento e alla conformazione degli estrusori, le differenze tra la cottura ad alta o a bassa idratazione e si tratterà di come i parametri di processo modifichino il prodotto finale.

2.1 La definizione di estrusione

L'estrusione alimentare è un processo in cui una serie di ingredienti grezzi vengono forzati attraverso un'apertura o una matrice con un disegno specifico e tagliati da lame ad una dimensione definita. Più in generale si può dire che l'estrusione è una tecnologia di produzione industriale di deformazione plastica



Fig. (7a): illustrazione del prodotto Chipos végétales aux herbes de Provence.
Immagine tratta dal sito di HappyVore. <https://happyvore.com/products/chipos-vegetales>



Fig. (7b): illustrazione del prodotto Impossible™ Chicken Tenders.
Immagine tratta dal sito di Impossible™ Burger. <https://impossiblefoods.com/products/chicken/frozen-tenders>



Fig. (7c): illustrazione del prodotto planted.pulled Spicy Herbs.
Immagine tratta dal sito di Planted. <https://it.shop.eatplanted.com/pages/nostri-prodotti>



Fig. (7d): illustrazione del prodotto Polpette di Soia.
Immagine tratta dal sito di Garden Gourmet. <https://www.gardengourmet.it/ricetta/veggie-poke-bowl-colorata>



Fig. (7e): illustrazione del prodotto Boneless Ribs.
Immagine tratta dal sito di Rival Foods. <https://rival-foods.com/product/plant-based-ribs/>



Fig. (7f): illustrazione del prodotto Veggy Burger.
Immagine tratta dal sito di Amadori. <https://www.amadori.it/prodotti/linea-veggie/veggie-burger>

che consente di produrre pezzi a sezione costante. La macchina che forza la miscela attraverso lo stampo è detta “estrusore” e la miscela è nota come “estruso”. L'estrusore è costituito da una o più viti rotanti inserite saldamente all'interno di un cilindro fisso, all'estremità del quale si trova l'apertura attraverso cui si forma il prodotto estruso desiderato. L'estrusione è classificabile sulla base della metodologia di azione in “estrusione a freddo” o “estrusione a caldo” e in base al metodo di costruzione dell'estrusore, ovvero in singola vite o doppia vite [5]. Nel caso della produzione delle TVP interessa l'estrusione a caldo con doppia vite. La cottura per estrusione è definita come il processo in cui materiali inumiditi, espansibili, amidacei e/o proteici vengono plastificati in un tubo mediante una combinazione di umidità, pressione, calore e taglio meccanico [4, 5]. L'elevata temperatura del prodotto e la pressione all'interno del cilindro permettono quindi la gelatinizzazione dei componenti amidacei, la denaturazione delle proteine, lo stiramento o ristrutturazione dei componenti trattili e, nel caso dell'estrusione a bassa idratazione, l'espansione esotermica dell'estruso [7]. La pressione è importante perché imprime alla massa lavorata la consistenza corretta e abbrevia le tempistiche del processo, rendendo la cottura più efficiente. È importante precisare che, come ci sono due tipologie di TVP, così ci sono due tipologie di estrusione: la cottura per estrusione a bassa umidità (LMEC, low-moisture extrusion cooking) e la cottura per estrusione ad alta umidità (HMEC, high-moisture extrusion cooking) [4]. Le differenze tra le due tecnologie verranno tra poco espresse.

2.2 Gli estrusori

I principi di funzionamento dell'estrusione richiedono che le materie prime vengano immesse nel cilindro dell'estrusore e le viti ne trasportino la massa all'interno. Verso l'apertura finale del cilindro il passo delle viti diminuisce e, limitando il volume, aumenta la resistenza della massa al movimento. Di conseguenza si comprime il materiale all'interno. Man mano che l'estruso si sposta lungo la canna del cilindro, le viti impastano il materiale fino a renderlo

una massa semisolido e plastificata [5]. L'estrusione fornisce una dispersione omogenea di tutti gli ingredienti attraverso la matrice proteica. Ciò non solo ne garantisce l'uniformità, ma consente anche agli ingredienti minori di associarsi intimamente con i potenziali siti di reazione che promuovono la reticolazione o altre modifiche chimiche e fisiche desiderabili. Aumentando la pressione, si genera calore che, insieme a qualsiasi altro riscaldamento aggiuntivo, provoca un rapido aumento della temperatura del composto alimentare. Infine la massa viene forzata attraverso una o più aperture ristrette all'estremità di scarico e l'estruso emerge sotto pressione dallo stampo [5]. All'uscita del cilindro si nota la differenza di composizione degli estrusori in LMEC o in HMEC. Nel primo caso l'estruso, lasciando lo stampo ancora a temperatura elevata, risente di una diminuzione di temperatura e di una caduta di pressione che ne permettono l'espansione fino alla forma finale desiderata, come illustrato nella Fig. (8) [4]. L'umidità della massa proteica evapora sotto forma di vapore. In questo modo le proteine vengono reticolate e si forma l'ariosa struttura spugnosa tipica delle LM-TVP. Nel secondo caso, la massa estrusa entra in una lunga filiera di raffreddamento. Grazie all'effetto di raffreddamento esterno della matrice è garantito un flusso laminare della proteina fusa. Il fuso proteico si raffredda più velocemente all'esterno che nel nucleo, provocando la riorganizzazione e la reticolazione delle proteine e la formazione di un filo fibroso, che esce dallo stampo di raffreddamento ad una temperatura del prodotto di circa 70°C [4].

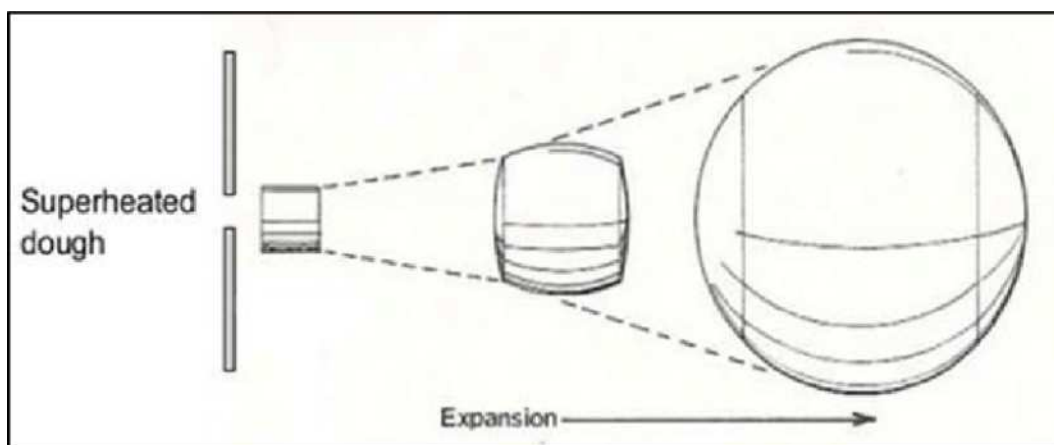


Fig. (8): espansione dell'impasto all'uscita dello stampo
Immagine tratta da [5]

Per garantire l'efficacia del processo, gli estrusori sono usualmente composti da cinque parti principali, la cui tipologia dipende dalla materia prima utilizzata e dal prodotto finale desiderato (Fig. 9) [5]. Le componenti sono:

- sistema di pre-condizionamento: il pre-condizionamento è un processo che viene applicato quando si utilizzano contenuti di umidità compresi tra il 20 e il 30% e lunghi tempi di permanenza del materiale all'interno del cilindro. Il pre-condizionamento favorisce un'idratazione uniforme delle particelle, riduce i tempi di ritenzione all'interno dell'estrusore e aumenta la produttività, grazie alla riduzione dell'usura dei componenti del cilindro e della vite, all'aumento della durata dell'attrezzatura e alla riduzione dei costi dell'energia coinvolta nel processo. Inoltre l'uso di un pre-condizionatore e di un dispositivo di sfiato nella progettazione dell'estrusore possono favorire la volatilizzazione e la rimozione dei sapori amari e sgradevoli associati a molte fonti proteiche vegetali. Alcuni di questi aromi indesiderati sono di natura volatile e vengono eliminati attraverso l'estrusione e la decompressione della proteina [5, 7];
- sistema di alimentazione: il sistema di alimentazione della materia prima nell'estrusore deve essere costante e ininterrotto per un funzionamento efficiente e uniforme del processo di estrusione. La zona di alimentazione è a temperatura ambiente [5];
- vite: la vite trasporta il materiale nel cilindro dell'estrusore, taglia e garantisce la qualità del prodotto finale. Gli estrusori a doppia vite sono costituiti da due viti parallele di uguale lunghezza che ruotano all'interno dello stesso cilindro, la cui superficie interna è liscia. Gli estrusori bivite sono molto importanti per l'estrusione ad alta umidità perché permettono una migliore omogenizzazione dell'impasto, riducendo la lunghezza del cilindro necessaria per avere la corretta miscelazione completa e uniforme degli ingredienti [5];

- cilindro: è diviso in alimentazione e impastatura. Spesso viene incamiciato all'esterno per consentire la circolazione di vapore o di olio per il riscaldamento oppure di acqua o di aria per il raffreddamento [5]. In alternativa si possono trovare anche punti di iniezione interna di vapore o spazi per il raffreddamento, consentendo così la regolazione precisa della temperatura nelle varie zone dell'estrusore. Attraverso diverse configurazioni e adattamenti del cilindro è possibile personalizzare il processo di estrusione in base alle specifiche esigenze del prodotto;
- fustella con meccanismo di taglio: la fustella ha le funzioni di dare forma al prodotto finale e promuovere la resistenza al flusso di materiale all'interno dell'estrusore provocando un aumento della pressione interna. Lo stampo può presentarsi in vari modelli e numero di aperture. Il meccanismo di taglio deve consentire di ottenere prodotti finali di pezzatura uniforme. La dimensione del prodotto è determinata dalla velocità di rotazione delle lame di taglio [5].

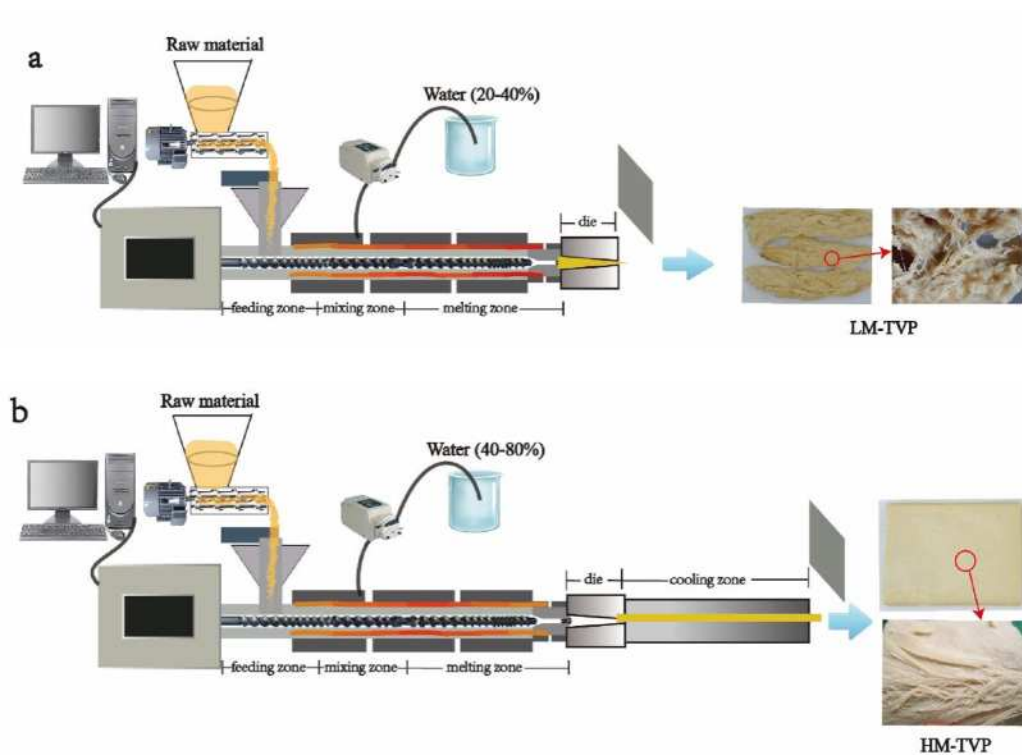


Fig. (9): rappresentazione schematica di un estrusore per LM-TVP (a) HM-TVP (b).
Immagine tratta da [6]

Nella produzione delle proteine vegetali testurizzate la materia prima quindi viene aggiunta nella zona di alimentazione a bassa temperatura. I solidi (proteine, amidi e/o fibre) e i liquidi (acqua, olio) vengono allora convogliati nella zona successiva con temperatura gradualmente crescente. Nella seconda zona gli ingredienti vengono impastati e mescolati fino a formare un impasto omogeneo a temperature comprese tra 130 e 180°C. Nel segmento tre, dove avviene la riduzione delle dimensioni e del passo della vite, si ha un aumento della velocità di taglio e della pressione. Nel caso dell'HMEC, in questo segmento la temperatura diminuisce tra i 100°C e i 130°C, la pressione aumenta ulteriormente e il materiale fuso viene condotto attraverso l'uscita dell'estrusore nella una lunga filiera di raffreddamento [4].

2.3 Modificazioni durante l'estrusione

Durante il processo di estrusione sotto l'effetto combinato di temperatura, forza di taglio e pressione alle proteine avvengono complesse modifiche conformazionali che determinano la qualità delle TVP. Alla materia prima proteica vengono applicate energie meccaniche e termiche che fanno sì che essa perda la sua struttura nativa ed organizzata e formi una nuova massa continua e viscoelastica. Le proteine vegetali vengono efficacemente denaturate durante il processo termico di cottura per estrusione. La denaturazione delle proteine ne riduce la solubilità, ne aumenta la digeribilità e distrugge l'attività biologica degli enzimi e delle componenti anti-nutrizionali [7].

Generalmente la proteina subisce quattro fasi principali di cambiamenti conformazionali: dispiegamento delle catene, associazione, aggregazione e reticolazione. Il processo di degradazione della struttura proteica comincia già dalla fase di pre-condizionamento. Nell'estrusore, all'interno della zona di fusione la velocità di movimento del materiale fuso diventa molto più lenta a causa della resistenza degli elementi di impasto e dell'alta temperatura, il che favorisce le interazioni tra le proteine srotolate e l'acqua [6]. I legami che subiscono delle

modifiche non sono però i legami peptidici della struttura primaria, ma quelli delle strutture terziarie. La struttura primaria delle proteine consiste nell'ordine di amminoacidi presenti lungo la catena peptidica, mentre la struttura terziaria è rappresentata dai ripiegamenti tridimensionali delle diverse regioni della proteina. Sono quindi particolarmente importanti per la struttura delle TVP le interazioni idrofobiche, i legami idrogeno e i legami disolfuro [4, 6].

Le proteine perdono prima la loro struttura organizzata mentre sono idratate e mescolate nella prima fase della cottura per estrusione, poi formano una massa fusa viscosa a causa degli effetti del calore e dello sfregamento all'interno del barile della vite. Le condizioni nel barile dell'estrusore sono estreme e possono portare alla completa disaggregazione dei complessi proteici. Il cilindro dell'estrusore, le viti e la matrice allineano le molecole nella direzione del flusso [7]. Infine avviene un legame incrociato tra le catene proteiche disposte a strati e, nel caso delle HM-TVP, nuove interazioni proteina-proteina avvengono nella matrice di raffreddamento (Fig. 10).

Un'altra importante modifica che il prodotto grezzo e crudo subisce è quella che riguarda il colore. L'alimento cotto e finito presenta infatti un colore marrone chiaro. La variazione di colore è riconducibile alle reazioni di caramellizzazione e di Maillard che avvengono all'interno del cilindro e nella matrice di raffreddamento durante il processo di estrusione. Queste hanno un effetto anche sul sapore. I protagonisti di queste reazioni sono gli amminoacidi liberi e gli zuccheri derivanti dalla presenza e degradazione di materiale polisaccaridico nella miscela come l'amido. Una parte dell'amido aggiunto, che non va incontro a gelatinizzazione, può venire degradato in glucosio e maltosio. Questi zuccheri possono quindi degradarsi teoricamente nella reazione di caramellizzazione o reagire con gli amminoacidi liberi nella reazione di Maillard. Quest'ultima è favorita da temperature alte del cilindro, contenuti di umidità bassi e forti forze di taglio, dando il colore bruno [5, 6].

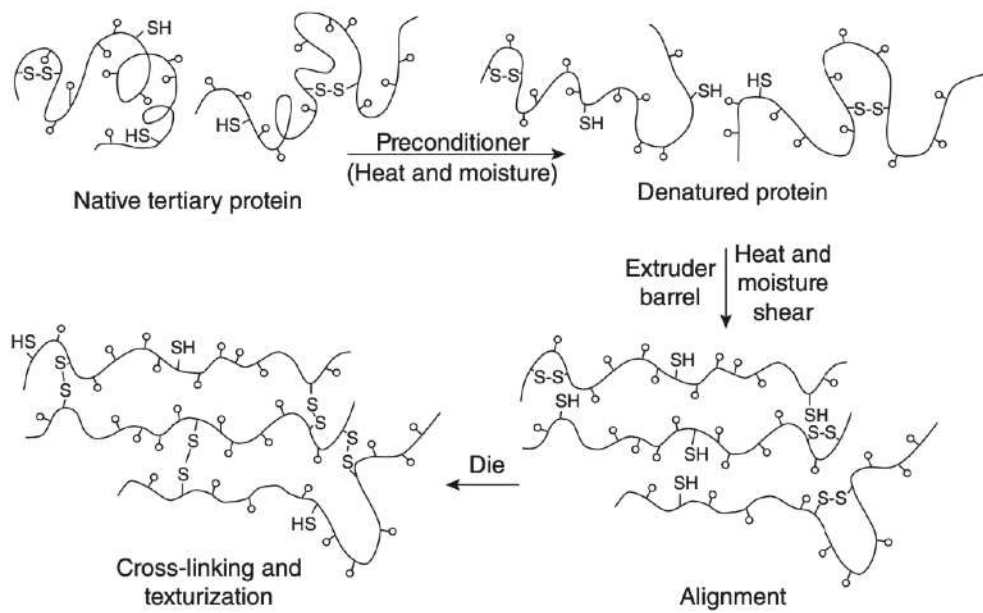


Fig. (10): denaturazione e riorganizzazione proteica durante l'estrusione.
Immagine tratta da [7]

2.4 L'influenza dei parametri di processo

La struttura fibrosa delle proteine vegetali testurizzate è caratterizzata dal grado di testurizzazione, dalla resistenza delle fibre, dalla durezza e dall'elasticità. Anche il colore, la capacità di ritenzione dell'acqua e la digeribilità sono considerati indicatori di qualità. I parametri di estrusione, quali temperatura del cilindro, velocità della vite, portata di alimentazione, contenuto di umidità e configurazione della vite, sono i punti chiave per il controllo della qualità delle TVP. La modifica dei parametri operativi infatti genera gli effetti complessivi di temperatura, forza di taglio e pressione che agiranno sul materiale fuso nell'estrusore [6].

In generale la temperatura del cilindro si riferisce principalmente alla temperatura nella zona di fusione. Può essere riscaldata da un sistema a camicia e raffreddata con acqua corrente, controllando il punto di inizio e di fine della fusione. Per garantire che il materiale fuso possa passare attraverso la matrice con successo e formare la struttura fibrosa, la temperatura della matrice deve essere impostata ad almeno 100°C, soprattutto per l'estrusione a bassa umidità. Per l'estrusione ad alta umidità la temperatura nella zona di raffreddamento influenza il profilo della velocità del flusso durante il momento di solidificazione e deve essere anch'essa

controllata per rimanere al di sotto dei 75°C. Nella produzione di proteine testurizzate di soia (TSP) solo quando la temperatura di fusione è superiore a 130°C, la struttura fibrosa può essere formata [6]. Una temperatura inferiore a 120°C può causare la rottura della fibra e dare una struttura non uniforme [6, 9]. Man mano che la temperatura di fusione aumenta da 130°C a 150°C, il grado di testurizzazione aumenta, indicando che il materiale si fonde gradualmente potenziando l'interazione proteina-proteina e proteina-acqua. Quando la temperatura aumenta da 150°C a 160°C, il grado di testurizzazione diminuisce, compaiono piccole rotture sulla superficie e il colore complessivo delle TSP vira verso la doratura. Questi risultati hanno dimostrato che, a una temperatura relativamente più elevata, la proteina viene eccessivamente degradata e le forze che si sono formate tra le molecole possono essere spezzate. Se la temperatura fosse superiore ai 160°C, l'estruso sarebbe difficile da formare. Una temperatura di fusione di circa 150°C produce prodotti estrusi con il miglior grado di testurizzazione, un colore più chiaro e una buona qualità sensoriale. Tuttavia il contenuto totale e la natura delle proteine sono un fattore determinante per la corretta temperatura di fusione richiesta. Come si vedrà anche per gli altri parametri, molte indicazioni di processo sono relative alla materia prima usata [6].

Il contenuto di umidità è un altro parametro di processo che può essere regolato per modificare la qualità delle TVP. L'acqua svolge una varietà di ruoli nel processo di estrusione come determinare la viscosità del materiale fuso, partecipare a reazioni chimiche, influire sulla temperatura e sulla pressione e agire come plastificante e agente schiumogeno. Il contenuto di umidità può essere studiato in relazione alle proteine testurizzate di grano (TGP). Nel glutine sia le glutenine sia le gliadine svolgono un ruolo importante nella formazione della struttura fibrosa dei prodotti estrusi. Durante l'estrusione ad alta umidità di prodotti analoghi alla carne a base di glutine di frumento, la struttura testurizzata è facilmente soggetta a rottura se sottoposta ad una temperatura di lavorazione nel cilindro di 110°C. Ciò è dovuto al fatto che, quando la temperatura di fusione è

inferiore a 130°C, con un alto contenuto di umidità il glutine non può essere completamente denaturato per formare la struttura fibrosa. Nell'estrusione a bassa umidità la temperatura adeguata del cilindro per le TGP è compresa tra 150°C e 170°C [6].

Un altro elemento importante è la vite, in particolare la rotazione della vite che fornisce una forza di taglio e spinge il materiale attraverso l'estrusore. L'alta velocità di rotazione provoca una diminuzione della pressione alla matrice a causa una riduzione della viscosità. Rispetto alle TVP ad alto contenuto di umidità le TVP a basso contenuto di umidità richiedono una velocità di vite più elevata, generalmente superiore a 380 rpm a seconda del rapporto lunghezza/diametro della vite [6].

Il tasso di alimentazione della materia prima influisce principalmente sul grado di riempimento dell'estrusore, sul tempo di permanenza del materiale nel cilindro e sulla pressione della matrice, influenzando così l'azione meccanica sul materiale. A basso tasso di alimentazione il tempo di permanenza del materiale nell'estrusore è più lungo, risultando quindi in una maggiore denaturazione delle proteine e in un colore del prodotto estruso più scuro [6]. Infatti un tempo di lavorazione più lungo aumenta le reazioni di caramellizzazione e di Maillard con conseguenze sul colore. Inoltre potrebbe aumentare la pressione all'interno del cilindro, comprimendo eccessivamente l'impasto. Tuttavia un tasso di alimentazione elevato non consente alle proteine di denaturarsi completamente a causa della diminuzione dell'energia meccanica specifica. Rispetto alle TVP ad alto contenuto di umidità le TVP a basso contenuto di umidità richiedono un tasso di alimentazione più elevato, di solito 2~4 volte superiore al primo, a seconda dei tipi di estrusori. È importante notare che l'intervallo di variazione del tasso di alimentazione dipende in gran parte dalla scelta dell'estrusore [6].

Durante l'estrusione sono soprattutto gli effetti di accoppiamento tra i parametri di estrusione che portano ai cambiamenti di conformazione dei componenti e che

influenzano quindi la qualità delle TVP. È ancora in fase di sviluppo una teoria universale per la migliore impostazione dei parametri, mentre è più comune procedere per prove empiriche a seconda della materia prima e della composizione utilizzata [6, 9]. Per ottimizzare il processo di estrusione, viste le molteplici variabili implicate, è possibile ricorrere alla Metodologia delle Superfici di Risposta (RSM, Response Surface Methodology). La RSM è una tecnica statistica utilizzata nell'ambito della progettazione sperimentale e dell'ottimizzazione di processi. Questa metodologia viene spesso impiegata in ambito scientifico e ingegneristico per trovare il miglior insieme di condizioni operative all'interno di un sistema complesso. Per fare ciò, vengono condotti esperimenti in cui i fattori vengono variati in modo sistematico e vengono misurate le risposte corrispondenti. I dati sperimentali vengono quindi utilizzati per costruire un modello matematico che approssima la relazione tra i fattori e la risposta. Questo modello può essere utilizzato per identificare le condizioni ottimali per massimizzare o minimizzare la risposta. Oltre a questa tecnica il processo può essere implementato facendo uso dell'Intelligenza Artificiale e di altre metodologie di ottimizzazione.

CAPITOLO 3.

Shear Cell Technology ed elettrofilatura

Oltre all'estrusione esistono altre tecnologie di produzione delle TVP. Ogni tecnica ha i propri vantaggi e svantaggi ed alcune sono ancora testate solamente a livello pilota. La scalabilità a livello industriale con i conseguenti studi dei costi e dell'energia necessaria al funzionamento è ancora in via di sviluppo. In questa tesi ci si concentrerà sull'analisi della Shear Cell Technology (SCT) e dell'elettrofilatura.

3.1 La Shear Cell Technology

La Shear Cell Technology (SCT) è un processo che si basa sullo stress termomeccanico e comprende la miscelazione, l'idratazione, la lavorazione termomeccanica e il raffreddamento della matrice proteica [4]. Come mostrato nella Fig. (11), l'effetto di strutturazione può essere ottenuto sia mediante celle di taglio in geometria conica-conica, costituite da un cono inferiore rotante e un nucleo stazionario, o mediante celle Couette cilindriche con un cilindro interno rotante [4, 12]. Entrambe le geometrie di impianto permettono la regolazione della temperatura e forniscono un flusso di taglio costante nell'interstizio tra la parte mobile e la parte stazionaria. La rotazione provoca un semplice flusso di taglio nella matrice proteica che allinea le proteine e ne causa la denaturazione e la solidificazione [10]. La velocità del cono inferiore rotante e l'angolo tra i due coni determinano il tasso di deformazione. La cella di Couette rispetto alla strutturazione conica-conica è stata descritta come più adatta per la scalabilità e per la qualità del prodotto in quanto mantiene uno spessore di prodotto costante in tutto il cilindro. In generale nella cella viene applicato un tasso di taglio costante

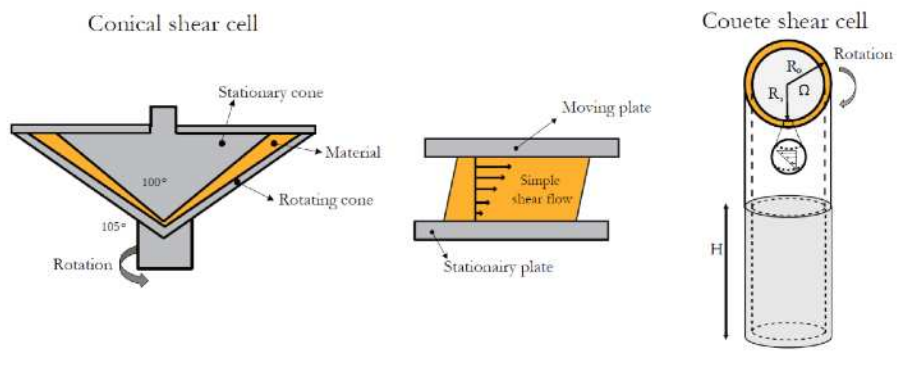


Fig. (11): dispositivi conico-conico e Couette per la SCT.
Immagine tratta da [12]

per 15 minuti con riscaldamento, seguito da un raffreddamento stazionario a temperatura ambiente. Il sistema chiuso e pressurizzato consente di operare a temperature superiori a 100°C senza l'evaporazione dell'acqua. Il contenuto d'acqua nel processo è del 50-70% e l'intervallo di temperatura durante la lavorazione è compreso tra 95 e 140°C [4, 11, 18]. Così come nell'estrusione ad alta umidità, anche nella SCT per ottenere un prodotto con fibre anisotrope è necessario utilizzare due differenti materie prime di partenza immiscibili tra loro. Un esempio è la combinazione di isolati o concentrati di proteine di soia con polisaccaridi o glutine di frumento. La separazione delle due fasi è alla base della formazione delle fibre. A concentrazioni diverse dei due componenti iniziali si associano materiali con fibre differenti [12]. Come nell'estrusione sono fondamentali i parametri di temperatura, umidità e di rotazione del cono o del cilindro.

A differenza dell'HMEC, i passaggi di miscelazione e idratazione avvengono al di fuori del dispositivo prima della lavorazione termomeccanica [4]. Altre diversità riguardano il fatto che la SCT consente un flusso di taglio ben definito durante il riscaldamento, un input di energia meccanica più basso e una produzione di prodotti fibrosi più grandi e più spessi [4]. Questi ultimi prodotti sono ottenibili grazie a celle di taglio Couette che hanno un interstizio ampio. Inoltre il raffreddamento nella SCT avviene senza applicazione di flusso, mentre nella HMEC avviene con il passaggio dell'estruso nella zona di raffreddamento ed è

quello il passaggio chiave per l'ottenimento della struttura fibrosa [12]. Il comportamento dei polimeri sotto la deformazione da taglio è meno complesso rispetto ai modelli di flusso applicati durante l'estrusione [18]. Questo rende più facile la gestione dei parametri tecnologici. Tuttavia rispetto alla cottura per estrusione, che è un processo continuo e più veloce, nelle celle di taglio avviene un processo discontinuo, che richiede almeno 20 minuti di tempo di lavorazione. La cella di Couette non ha riscontrato ostacoli nella scalabilità a livello industriali [4].

3.2 L'elettrofilatura

A differenza della cottura per estrusione e della SCT, l'elettrofilatura è una cosiddetta strategia "bottom-up" che produce fibre molto sottili assemblate dal basso verso l'alto con altri elementi strutturali per diventare prodotti simili alla carne. Si basa sul principio che una soluzione di polimero venga spinta attraverso una cannula o un filatore con un potenziale elettrico rispetto a un elettrodo di terra, detto collettore. Si verifica un accumulo di carica sulla superficie della goccia che esce dal filatore, causandone un'instabilità superficiale e l'evaporazione rapida del solvente. Crescono quindi fibre molto sottili di circa 100 nm che vengono attratte verso il collettore di terra [4, 11]. La tensione elevata tra la bocchetta e il collettore guida l'elettrofilatura. I sistemi sono composti da quattro componenti: un alimentatore ad alta tensione, un'unità di alimentazione come, ad esempio, una siringa con filatore, una soluzione di polimero e un collettore a terra (Fig. 12) [4]. Il processo di elettrofilatura è stato descritto come economico e scalabile. In passato è stato utilizzato per produrre nanofibre per le industrie alimentari per incapsulare composti bioattivi come polifenoli, probiotici e vitamine. Il processo di elettrofilatura è influenzato dalle proprietà del polimero come struttura, concentrazione, peso molecolare, dalle proprietà del solvente come, ad esempio, conducibilità elettrica, viscosità, tensione superficiale e dalle condizioni di processo e ambientali come temperatura e umidità relativa [4]. La sfida più grande è che la materia prima deve essere altamente concentrata, con alta

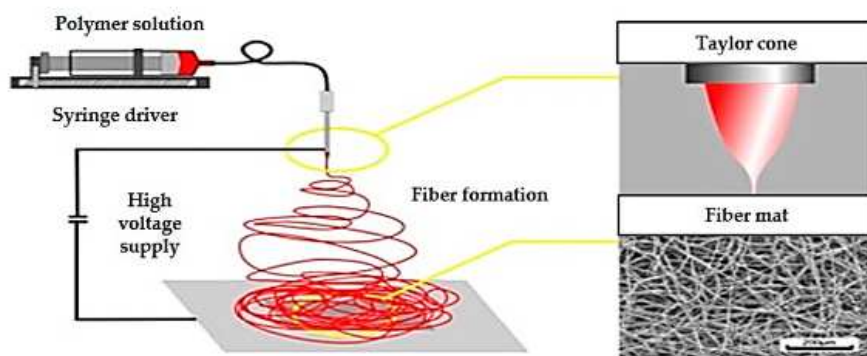


Fig. (12): illustrazione del processo di elettrofilatura.
Immagine tratta da [10]

solubilità e, nel caso delle proteine, queste devono comportarsi come una bobina casuale, non come globuline, requisito che di solito non è soddisfatto dalle proteine vegetali nel loro stato nativo e in quanto formano aggregati insolubili quando denaturate [4, 12]. Per essere elettrofilata una proteina deve essere in grado di solubilizzarsi bene e avere una configurazione strutturale casuale. Numerose proteine animali, ad esempio il collagene e la gelatina, sono state già elaborate con successo in fibre mediante l'elettrofilatura mentre la proteina vegetale meglio elettrofilata è stata la zeina, una proteina del mais [4]. La gelatina è stata utilizzata come polimero carrier per altre proteine vegetali, ma questo procedimento non è adatto per la produzione di prodotti interamente vegetali [4, 11]. Di conseguenza è una tecnica ancora in via di sviluppo.

Nelle tabella (2) vengono riassunte le differenze tra le tecnologie di estrusione, SCT ed elettrofilatura. L'estrusione mostra avere più vantaggi rispetto alle altre tecniche, con svantaggi che riguardano principalmente il colore del prodotto.

Technology	Advantages	Disadvantages
Extrusion	<ul style="list-style-type: none"> -High productivity -Low cost -Versatility -Energy efficiency -Anti-nutritional factors denaturation -Increase protein digestibility 	Changes in color due to Maillard reaction, caramelization, hydrolysis, and degradation of pigments
High-temperature induced shearing	<ul style="list-style-type: none"> -Cost-effective -Produce defined fibrous structure 	-Require more investigations for scaling
Wet-spinning	<ul style="list-style-type: none"> -Produce defined fibrous protein products 	<ul style="list-style-type: none"> -Requires pure proteins -Low pH -High salt concentrations and chemical additives -Large amounts of wastes
Electrospinning	<ul style="list-style-type: none"> -Cost-effective -Scalable -Production of very thin fibrils 	<ul style="list-style-type: none"> -Several parameters to control -Difficulties to electrospin plant proteins
Freeze structuring	<ul style="list-style-type: none"> -Modulation of textural properties of plant proteins 	-Several freezing conditions to optimize and monitor
Mixing plant proteins and hydrocolloids	<ul style="list-style-type: none"> -Formation of fibrous structure that can be modulated 	-Require hydrocolloids and the divalent metal cations for the precipitation
Bioprinting (3D printing technology)	<ul style="list-style-type: none"> -Enable the design of products with texture similar to muscle fibers -Tailor the nutritional content of the product 	<ul style="list-style-type: none"> -Require maturation under specific conditions -High production cost -The complexity of spatial structure

Tabella (2): pro e contro delle tecnologie di produzione per gli analoghi della carne.
Immagine tratta da [11]

CAPITOLO 4.

Conclusioni

Nel primo capitolo di questa tesi è stato presentato il problema della sostenibilità ambientale delle diete ad elevato consumo di prodotti di origine animale, tra cui la carne. In particolare si è fatto riferimento al confronto tra carne bovina, di maiale e di pollo e gli analoghi prodotti vegetali. Per aiutare la popolazione mondiale in crescita a ridurre il consumo di carne e mantenere un adeguato apporto proteico nella dieta, sono nati sul mercato molti prodotti plant-based che mirano ad essere una alternativa al simile prodotto animale, ma il più sostenibile possibile. Essi sono ottenuti dalla lavorazione e trasformazione di proteine vegetali, principalmente di soia, grano e pisello, in proteine vegetali testurizzate. Queste si presentano in due aspetti differenti, a seconda che siano ad alta o a bassa umidità. Le proteine vegetali a bassa idratazione vengono utilizzate soprattutto come granulare nella preparazione di burger, polpette o salsicce plant-based. Le proteine vegetali testurizzate ad alta idratazione hanno avuto un maggiore successo tra i consumatori, in quanto la loro struttura fibrosa e il sapore sono sensorialmente meglio accettate rispetto alla precedente tipologia. Grazie alla produzione di tali proteine è possibile trovare sul mercato prodotti vegetali simili a nuggets, sfilacciati, spiedini e tagliate.

Nella seconda parte è stata analizzata l'estrusione come tecnologia per la produzione delle TVP. Questa differisce soprattutto per la composizione degli elementi tecnici se destinata alla realizzazione di LM-TVP o HM-TVP. Infatti nel caso della produzione di LM-TVP è necessaria la fase di espansione della massa estrusa, così da conferire la caratteristica consistenza ariosa. Nel caso delle HM-

TVP è di fondamentale importanza per la strutturazione delle fibre la presenza di una filiera di raffreddamento, nella quale si abbassa la temperatura della massa estrusa senza l'evaporazione dell'umidità. I parametri di processo che influenzano la qualità del prodotto fibroso estruso sono la temperatura, il contenuto di umidità, la velocità di rotazione della vite e il tasso di alimentazione. Tuttavia oggi l'estrusione a bassa umidità non è idonea alla realizzazione di un prodotto finito tal quale simile alla carne: la texture e la struttura spugnosa ne sono la causa. Per ottenere preparazioni più fibrose si sfrutta l'estrusione ad alta umidità, ma la difficoltà nel trovare il corretto accoppiamento dei parametri di lavorazione rende questa tecnologia complessa.

Nonostante ciò, come affrontato nella terza parte, l'estrusione è ancora oggi la tecnologia più utilizzata rispetto ad altre, come la SCT e l'elettrofilatura. Infatti la Shear Cell Technology richiede ancora miglioramenti dal punto di vista della scalabilità del processo e diffusione dell'utilizzo della tecnologia stessa, mentre l'elettrofilatura riscontra problemi nell'idoneità funzionale delle proteine vegetali.

In conclusione, è quindi da sottolineare il fatto che le tecnologie di produzione delle TVP sono ancora in fase di sviluppo, per cui il prodotto vegetale non è interamente identico all'analogo animale. Tuttavia, considerando l'evoluzione tecnologica già percorsa fino ad adesso e la conseguente larga diffusione che stanno già avendo queste proposte così come sono ora formulate, si può dire che in futuro i prodotti plant-based a base di TVP possono migliorare ancora e guadagnare una propria posizione all'interno del settore alimentare, indipendentemente dall'analogia raggiungibile con il similare prodotto a cui si ispirano. È infatti da ricordare che l'obiettivo della produzione di cibi proteici plant-based non è quello di eliminare e sostituire utopicamente l'intero consumo di carne, ma quello di ottenere delle proposte a sé appetibili, di facile riconoscimento funzionale e accessibili dai consumatori, in modo tale che questi siano in grado di differenziare la propria dieta per raggiungere un sistema alimentare più sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Natalie R. Rubio, Ning Xiang & David L. Kaplan. Plant-based and cell-based approaches to meat production. *Nature communications* (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20061-y>
- [2] H. C. J. Godfray et al. Meat consumption, health, and the environment. *Science* (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aam5324>
- [3] J. Poore, T. Nemecek. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- [4] Marie-Christin Baunea, Nino Terjunga, Mehmet Çağlar Tülbeke, Fatma Boukid. Textured vegetable proteins (TVP): Future foods standing on their merits as meat alternatives. *Future Foods* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100181>
- [5] Skarma Choton, Neeraj Gupta, Julie D Bandral, Nadira Anjum and Ankita Choudary. Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation Journal* (2020). <https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367>
- [6] Jinchuang Zhang, Li Liu, Hongzhi Liu, Ashton Yoon, Syed S. H. Rizvi & Qiang Wang. Changes in Conformation and Quality of Vegetable Protein during Texturization Process by Extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (2018). <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1487383>

- [7] M. N. Riaz. Texturized vegetable proteins. *Texas A&M University, USA* (2011). <https://doi.org/10.1533/9780857093639.395>
- [8] Nikos Alexandratos, Jelle Bruinsma. World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision. *Agricultural Development Economics Division, FAO* (2012)
- [9] Jinchuang Zhang, Qiongling Chen, David L. Kaplan, Qiang Wang. High-moisture extruded protein fiber formation toward plant-based meat substitutes applications: Science, technology, and prospect. *Trends in Food Science & Technology* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.008>
- [10] Zahari I., Östbring K., Purhagen J.K., Rayner M. Plant-Based Meat Analogues from Alternative Protein: A Systematic Literature Review. *Foods* (2022). <https://doi.org/10.3390/foods11182870>
- [11] Fatma Boukid. Plant-based meat analogues: from niche to mainstream. *European Food Research and Technology* (2020). <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03630-9>
- [12] Birgit L. Dekkers. Creation of fibrous plant protein foods. *Wageningen University & Research* (2018).
- [13] M. Nieuwland, P. Geerdink, P. Brier, P. van den Eijnden, Jolanda T.M.M. Henket, Marloes L.P. Langelaan, Niki Stroeks, Henk C. van Deventer, Anneke H. Martin. Food-grade electrospinning of proteins. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2013.09.004>
- [14] Prabhu Pingali, Jocelyn Boiteau, Abhinav Choudhry, Aaron Hall. Making meat and milk from plants: A review of plant-based food for human and planetary health. *World Development* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2023.106316>

- [15] John B Nezlek, Catherine A Forestell. Meat substitutes: current status, potential benefits, and remaining challenges. *Current Opinion in Food Science* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100890>
- [16] Li Day. Proteins from land plants - Potential resources for human nutrition and food security. *Trends in Food Science & Technology* (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2013.05.005>
- [17] Good Food Institute. Plant Protein Primer: exploring the landscape of plant protein sources for applications in plant-based meat, eggs, and dairy. <https://gfi.org>
- [18] Oguz K. Ozturk, Bruce R. Hamaker. Texturization of plant protein-based meat alternatives: Processing, base proteins, and other constructional ingredients. *Future Foods* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100248>
- [19] Good Food Institute. 2022 State of the Industry Report. Plant-based meat, seafood, eggs, and dairy. <https://gfi.org>

SITOGRAFIA

Webinar. Dr. Birgit Dekkers: Shear cell technology and plant-based protein. *The Good Food Institute, Rival Foods* (2020)

Webinar. High Moisture Extruder - Food Pilot webinar. *Flanders' FOOD* (2020)