

SZAKDOLGOZAT

Borsi Noémi Szakdolgozat

Borsi Noémi
2023

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet

**A csokoládé 3D nyomtatási technológia
típusai, fejlesztési lehetőségei**

Borsi Noémi Szakdolgozat

Borsi Noémi
Budapest
2023

**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet**

**Szak neve: Csokoládé-, kávé-, teakészítő mester szakmérnök / szaktanácsadó szakirányú
továbbképzési szak**

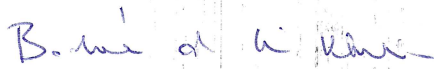
Szakkolgozat készítés helye: MATE ÉTTI Gabona és Iparinövény Technológia Tanszék

Hallgató: Borsi Noémi

A szakkolgozat címe: A csokoládé 3 D nyomtatási technológia típusai, fejlesztési lehetőségei

Konzulens: Badakné dr. Kerti Katalin
Külső konzulens esetén tanszéki felelős

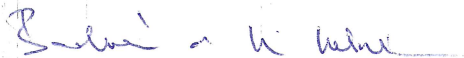
Beadás dátuma: 2023.05.03



szakkolgozat készítés helyének vezetője
(Badakné dr. Kerti Katalin)



konzulens
(Badakné dr. Kerti Katalin)



Badakné dr. Kerti Katalin
szakfelelős

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Célkitűzés	3
3. Irodalmi áttekintés	4
3.1. A csokoládé összetétele	4
3.2. A csokoládé szerkezete	6
3.2.1. A kakaóvaj kristályosodása	6
3.2.2. Zsírvirágzás	6
3.2.3. Kakaóvaj zsírösszetétele	7
3.2.4. Temperálás	8
3.2.5. Kristályosodási sebesség növelése	8
3.3. A csokoládé textúrája	9
3.4. A csokoládé viszkozitása és folyási paraméterei	11
3.5. A csokoládé reológiája	11
3.5.1. A szemcseméret	12
3.5.2. A kakaóvaj	12
3.5.3. Emulgeálószer	12
3.5.4. Nedvességtartalom	13
3.6. A csokoládé additív rétegyártása	13
4. Következtetések	15
4.1. A csokoládé 3D nyomtatása	15
4.1.1. 3D nyomtatás extrúzióval	18
4.1.1.2. Hideg extrúzió	19
4.1.1.3. Az extrúzió fontosabb paraméterei	21
4.1.1.4. Extrudálás utáni mechanikai jellemzés	22
4.1.1.5. 3D extrúzió folyamatoptimalizálása	23
4.1.2. 3D csokoládényomtatás szinterezéssel, kötéssel	25
4.1.4. Inkjet technológiás 3D nyomtatás	26
4.2. 3D nyomtatás technológiáinak felhasználása és összegzése	28
4.3. A csokoládé 3D nyomtatási technológia folyamatoptimalizálása	31

4.3.1.	<i>Adaptív extrudálási rétegvastagság-optimalizálás a területváltozási sebesség alapján</i>	32
4.4	<i>3D csokoládényomtatás lehetséges üzleti modellejének vizsgálata</i>	33
4.4.1.	<i>Élelmiszer-ellátási lánc üzleti modellje</i>	33
4.4.2.	<i>Hagyományos csokoládégyártási és -gazdálkodási modell</i>	34
4.4.3.	<i>Gyártó által vezetett és kereskedő által vezetett csokoládégyártási modell</i>	34
4.5.	<i>A csokoládé 3D nyomtatás alkalmazás technológiájának kiterjesztése</i>	35
4.5.1	<i>A csokoládé gyógyászati értéke</i>	35
4.5.2.	<i>A csokoládé, mint funkcionális élelmiszer</i>	36
4.5.2.1.	<i>Csokoládé hozzáadott C-vitamin tartalommal</i>	36
4.5.2.2.	<i>Lutein hozzáadása</i>	37
4.5.2.3.	<i>Metil-cellulóz hozzáadása</i>	38
4.5.3.	<i>Mikroenkapszuláció</i>	38
5.	Összefoglalás	40
6.	Irodalomjegyzék	42

Borsai Noémi Szakdolgozat

1. Bevezetés

Becslések szerint globális szinten az édesipari termékek közül a csokoládé eladásából származik az összes bevételének több mint a fele, aminek fő mozgatórugója a csokoládé kedvező egészségügyi hatásai, széleskörű felhasználhatósága és szezonális értékesítése. Viszont a csokoládé 3D nyomtatásával egy új termékkategória jön létre az édesiparban, aminek köszönhetően egyedi igényekre szabható termékek előállítása is egyszerűbbé válik, különböző formák és struktúrák létrehozása megvalósítható. A csokoládé 3D nyomtatással a csokoládé összetétele is könnyebben szabályozhatóvá válik, ez lehetővé teszi a személyre szabott dúsított élelmiszerek gyártását. (Internet 1.)

A 3D élelmiszernyomtatási technológia (3D-FP) nemcsak a személyre szabott formák és textúrák létrehozására alkalmas, de lehetővé teszi a végső termék táplálkozási értékének, vitamintartalmának személyre szabását, valamint étrendi korlátozások miatti só- és cukortartalom optimalizálását. Az élelmiszerek 3D nyomtatásában jelenleg a leggyakoribb adagolási módszer az extrúzió, amely lehet térfogatkiszorításos, idő-nyomás értékeken alapuló adagolás és forgócsavaros extrúzió. (Mantihal et al, 2017)

Nem csupán az új termékkategória megjelenésével lehet számtani a csokoládétermékek eladásának növekedésére, hanem a globális csokoládéipar piacának bővítésére kiváló lehetőségeket kínálnak a nagy fejlődő országok, mint például Kína és India. Ez részben annak is köszönhető, mivel a prémium termékek iránti kereslet csakúgy, mint a csokoládé funkcionális élelmiszerként való felhasználása iránti is az igény fokozatosan növekedik. (Internet 1.)

Mivel az édesipar erősen fogyasztó-vezérelt, így a gyártóknak fejlesztési és marketingstratégiákra kell támaszkodniuk új piacok megszerzése, és a fogyasztói bázis növelése érdekében. Főbb stratégiák közé tartozik a termelési folyamat konszolidációja, és a márka imázs növelése a gyártó szociális felelősségvállalásával. A 3D csokoládényomtatás egyszerűbben a fogyasztói igényekre szabható a hagyományos csokoládégyártással szemben, de ugyanakkor más üzleti modellt kell felépíteni a nyomtatott csokoládétárgyak

tervezésétől a fogyasztásra való eladásig, valamint a gyártás jogi háttere is új keretekre kell szabni.

A csokoládé nyomtatási technológia innovatív, jelentős ígéretet jelent az élelmiszer-innováció, a termelés és az ellátási lánc jövőbeli rekonstrukciója szempontjából, de az alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátású élelmiszer-értéklánc elérése érdekében is.

Ahhoz, hogy a csokoládé 3D nyomtatása nyereséges maradjon, szilárd üzleti modellekre van szükség. Figyelembe kell vennie, hogy a fogyasztó számára mennyire hasznos, valamint az ellátási lánc résztvevőinek, nevezetesen a gyártónak és a kiskereskedőnek a jövedelmezőségi tényezőit. (Fu et al., 2016)

Mind az élelmiszernyomtatás, mind a robotika alapú gyártás automatizálhatja az ételkészítés folyamatát, és csökkentheti az emberi munkások leterheltségét, de az általuk közvetített felhasználói élmények nagyon eltérőek. Azáltal, hogy az élelmiszernyomtatásban közvetlenül változtatható az élelmiszerforma és az alapanyag ez a felhasználók kreativitását és kontrollját helyezi a folyamat középpontjába, míg a robotika alapú gyártás különböző műveletek automatizálásával próbálja csökkenteni az emberi részvételt és a munkaterhelést. Eddig a személyre szabott speciális élelmiszerek elkészítéséhez kézművesfeldolgozás volt szükséges, amely igen drágább és alacsonyabb a termelési aránya. Az élelmiszernyomtatási technológiák a közeljövőben túlléphetnek ezeken a korlátokon, és platformot kínálhatnak az ételtervezéssel kapcsolatos kísérletezéshez az ízek, színek és formák tekintetében. (Sun et al., 2015)

A csokoládé az egyik leggyakrabban használt anyag élelmiszernyomtatásban, részben az olvadt csokoládé jó extrúziós képessége miatt, részben pedig mivel népszerű cikk az élelmiszerpiacon. Viszont ennek ellenére is kevés a publikált szakirodalom a gyakorlati megvalósításáról és annak részleteiről. A csokoládé az első élelmiszernyomtatók között széles körben nyomtatásra használt anyag, de a vele való munka még mindig sok kihívást jelent. Ez annak köszönhető, hogy összetétele változatos, ami a kakaó, a tejszír és a különböző trigliceridek egyvelegéből áll össze. (Lanaro et al, 2017)

2. Célkitűzés

Dolgozatom célja megvizsgálni milyen technológiai lehetőségek vannak a 3D csokoládényomtatásra, és ezeknek az elméleti összehasonlítását terveztem megvalósítani, valamint feltérképezni, hogy milyen fejlesztési lehetőségek rejlenek ebben az új innovatív csokoládégyártási technológiában.

Céлом 3D csokoládényomtatással kapcsolatos szakirodalom összegyűjtése, elemzése, kategorizálása és az, hogy betekintést nyerhessek abba, hogy ez a technológia merre halad, a jövőben milyen szerepet tölt majd be az élelmiszerfeldolgozásban és -gyártásban. Mivel a csokoládényomtatási technológia egy egészen új feldolgozási eljárás, emiatt még a kutatása nem eléggé kiterjedt, magyar nyelvű cikkek és kutatások nagyon limitált mennyiségben elérhetőek, részben ez is motivált arra, hogy dolgozatomat ennek a témának vizsgálatával készítssem el.

A csokoládé 3D csokoládényomtatása előtt a nyomtatni kívánt anyag, vagyis a csokoládé összetételének és kristályosodási tulajdonságainak megismerése igen fontos. A tradicionális csokoládé gyártási paraméterei eltérőek, erre való tekintettel a 3D csokoládényomtatás optimális paramétereit szeretném keresni különböző kutatások eredményei alapján, valamint a 3D nyomtatásban rejlő fejlesztési lehetőségeket szeretném feltárni. A hagyományos csokoládégyártás leváltása a 3D csokoládégyártás térnyerésével a hagyományos üzleti modell átformálását is hozhatja magával, így az üzleti modellek vizsgálatát is terveztem elvégezni.

3. Irodalmi áttekintés

3.1. A csokoládé összetétele

A csokoládé fő alapanyaga a kakaó, helyettesítője nincs, ráadásul termelési területe is korlátolt, az északi és déli szélesség 10. foka között terem, tehát főként Nyugat-Afrikai országok termesztik (Ghána, Elefántcsontpart, Kamerun, Nigéria). A termést évente kétszer szüretelik le a fő- és középtermés formájában, a főtermés mennyisége nagyobb, de mértéke a termesztő országtól függően változó. (Internet 1.)

A csokoládé fizikai tulajdonságai nagyon szűk hőmérséklet-tartományon belül jelentősen megváltozhatnak, ezért egy összetett tulajdonságokkal rendelkező anyag. A szobahőmérsékletű csokoládé nagyrészt félig szilárd állapotban van. Az anyag azonban többnyire viszkózus, és alacsony, körülbelül 10-20 Pa folyási feszültséggel rendelkezhet, amikor eléri a 37 °C-os testhőmérsékletet. A csokoládé meghatározható lágy szilárd anyagként, koncentrált oldatként vagy pasztaként. A csokoládé kakaóvajból és tejszírokból álló folytonos zsírmátrixból áll, és nagy koncentrációban (50-60 térfogatszázalék) lebegő szilárd részecskéket, elsősorban cukorkristályokat, kakaót és tejszáranyagot tartalmaz. (Chen és Mackley, 2016)

A csokoládé cukortartalma hagyományosan körülbelül 50%-os, a legtöbbet szacharóz formájában tartalmaz, de a tejszokoládé emellett még tartalmaz némi laktózt is. Mivel a cukorbetegség nem tudnak nagy mennyiségű cukrot elfogyasztani, ezért csokoládékészítéshez alternatív recepteket hoztak létre fruktóz, vagy más, cukorhelyettesítő bulk édesítőszerrel, mint például a szorbit vagy a maltit hozzáadásával. A kevesebb kalóriát tartalmazó vagy fogbarát csokoládék iránti jelenlegi kereslet megjelenése eredményeként más cukorhelyettesítőket is kezdtek használni. (Beckett, 2019)

Szacharózt az édes íz fokozása érdekében használnak a csokoládéhoz, de más ízekre is hatással van. A magasabb cukortartalom a keserű íz érzetének csökkenését okozza.

Kakaóvajjal a selymesebb textúra elérése érdekében adnak hozzá. A zsírtartalom növelésével egy simább, teltebb állagú és gyorsabb olvadású csokoládé gyártása lehetséges. Mivel a kakaóvaj megköti a keserű összetevőket, a keserű íz csökken a kakaóvajtartalom

növekedésével. Testhőmérsékletre melegítve a kakaóvaj folyékony lesz. Ez biztosítja a csokoládé íz kiteljesedését fogyasztás közben.

A kakaóvaj viszont drága alapanyag, ezért a csokoládékészítéshez használt mennyiség csökkentésére irányuló kísérletet végeztek Bolenz és munkatársai (2008), a kevesebb kakaóvaj hozzáadását több víz és finom szemcseméretű kristálycukorral ellensúlyozták, amit később elpárologtattak, így kedvező reológiai paraméterekkel rendelkezett a késztermék. Az eljárás költségei viszont nem eredményeztek megtakarítást.

A csokoládé tejes és karamell ízűvé tételéhez tejpport adnak hozzá. A cukrok karamellizálódnak, a tej kazeinje pedig Strecker-lebomláson megy keresztül, így a tejes csokoládétermékek jellegzetes karamellízt kapnak. Mivel a tejsír hígítja a kakaóvaját és növeli a folyékony fázis mennyiségét, ez csökkenti a csokoládé keménységét. A növekvő tejsírtartalmával a tejszokoládé keménységének objektív és érzékszervi értékei egyaránt csökkennek. (Prawira et al., 2009)

Egy másik gyakori összetevő az emulgeálószer, jellemzően szójalecitint adnak hozzá a kereskedelmi csokoládéhoz. Ez az összetevő segít bevonni a hidrofíl cukorrészecskéket a hidrofób zsírmolekulákkal. A csokoládénak kakaóvaját kell tartalmaznia, amely szintén elsősorban az anyag reológiai tulajdonságaiért felelős mind folyékony, mind szilárd állapotban. (Chen és Mackley, 2016)

Az emulgeálószer a csokoládéhoz legfeljebb 0,5%-os koncentrációban adják hozzá, hogy ezzel csökkentsék a viszkozitást a feldolgozás során, és fokozzák a konsolás hatékonyságát. A másik oka, hogy lecitint adnak hozzá, mert ez csökkenti az optimális állag eléréséhez szükséges hozzáadott kakaóvaj mennyiségét, és ez csökkentheti a gyártási költségeket. 0,3%-os mennyiségben hozzáadott lecitinnel a csokoládé viszkozitása csökken, jobban ellenáll a nedvességnek. Fontos a megfelelő mennyiségben való adagolása, mivel túl sok lecitin a termék ízében problémákat eredményezhet, és növeli annak viszkozitását. 0,5% lecitin hozzáadásával pedig a viszkozitás és folyáshatár is emelkedik. (Prawira et al., 2009) Schantz és munkatársai (2001) kísérletei során különböző élelmiszeripari alkalmazásban használt emulgeálószeret használtak csokoládégyártáshoz, tanulmányaik során kimutatták, hogy a különböző gyártóktól beszerzett azonos emulgeálószer hatásaik különbözőek.

3.2. A csokoládé szerkezete

3.2.1. A kakaóvaj kristályosodása

A csokoládénak kakaóvaját kell tartalmaznia, amely elsősorban az anyag reológiai tulajdonságaiért felelős mind folyékony, mind szilárd állapotban. A csokoládé fő zsírkomponense polimorf, ami hozzájárul a csokoládé összetettségéhez. A hagyományos "Wille és Lutton" polimorf számozási séma (I-VI) hat különböző kristályos konfigurációban határozza meg a kakaóvaj létezését, a hőstabilitás növekedésével az I. formától a VI. formáig. A kakaóvajról ismert, hogy számos kristályos formában létezhet.

A kakaóvajban található számos polimorf és kristályos kiserelés jellemzésének egy másik módja a Larsson-konvenció alkalmazása. Valójában a kakaóvaj V formájú kristályai a legkívánatosabbak, mert jó formázási tulajdonságokkal, egyenletes fényes felülettel és kellemes állaggal rendelkeznek a kész csokoládétermékekhez. Következésképpen jól temperálható, egy sor aprólékos hőmérséklet-szabályozott eljárásra van szükség ahhoz, hogy biztosítsuk a megfelelő V polimorf kristályok képződését. Ha ezt a lépést kihagyjuk, a termék hajlamosabb lehet a zsírkristályosodásra (fat bloom), ami fizikai hiba. A zsírkristályok tárolás során gyakran fehér vagy szürkésfehér réteggént jelenik meg a csokoládétermék felületén, ez pedig semmiképp sem kívánatos. (Chen és Mackley, 2016)

A római nomenklatura használatos az iparban szabványos nomenklaturaként. Újabban viszont a mindössze csak ötféle zsírszerkezet létezésére találtak Lanaro és munkatársai (2019) bizonyítékot, ami szerint a III és IV kristályforma azonos.

3.2.2. Zsírvirágzás

A csokoládéban a zsírkristályosodás különböző formái többféle tulajdonságot eredményeznek. Az alacsonyabb számozású kristályformák kevésbé stabilak, hajlamosak arra, hogy stabilabb, magasabb olvadáspontú formákká alakuljanak. Ezen átalakulás során a zsír térfogata változhat, elvándorolhat, az ebből következő megnövekedett felületi érdesség vagy zsírvirágzás negatívan hat a csokoládé élvezeti értékére, minőségére. Az I. forma olvadáspontja -5 és 5 °C között van, ez a leginstabilabb forma, ami gyorsan átalakul II/alfa

formává. Ezután a csokoládé kristályformái már lassabban alakulnak át III/béta és IV/béta formává. A IV/béta forma már stabilabb, viszont puha, töréskor nem roppan. A V/béta forma napokkal később alakul ki, ipari alkalmazáshoz nagyszerű tulajdonságokkal rendelkezik. A VI/béta forma nagyon stabil, hónapokkal vagy évekkal később alakul ki szilárd anyagból szilárd anyaggá való átalakulással, zsírvirágzás kíséri, tehát ez is elkerülendő. (Lanaro et al.,2019)

3.2.3. Kakaóvaj zsírösszetétele

Chen és Mackley (2016) nyomán a triacilglicerinek (TAG-ok) vagy trigliceridek, amelyek a legtöbb természetes olajban és zsírban jelen vannak, a kakaóvaj nagy részét alkotják. Egy glicerín molekula gerincéhez kapcsolódó három zsírsavmolekulát tartalmazó észterek alkotják a TAG-okat. A trigliceridek összetétele és kristályos csomagolási mintái azért is rendkívül fontosak, mivel meghatározzák az olajok és zsírok fizikai és kémiai tulajdonságait. A kakaóvajban található zsírsavak több mint 95%-a palmitinsav (P), sztearinsav (S) és olajsav (O). Ez a három zsírsav együttesen hozza létre a három fő trigliceridet: POP, SOS és POS.

A trigliceridek legstabilabb formája bizonyos mértékű molekuláris rendeződést még mutat közvetlenül a kakaóvaj olvadáspontja felett, amely jellemzően 40 °C felett van. A láncok deformált székszerű szerkezetet vesznek fel, de a trigliceridek pontos szerkezeti felépítését még mindig nem teljesen ismerjük.

A kakaóvaj 15 °C és 40 °C között olvad el nagyrészt, ami egy viszonylag széles hőmérsékleti tartománynak számít. A triglicerid zsírok nagyjából 16 százaléka folyékony 20 °C-on, emiatt a kakaóvaj és a csokoládé szobahőmérsékleten félszilárd. A kakaóvaj nagy része 40°C feletti hőmérsékleten lesz olvadt állapotban. A folyékony részek a zsírkristályok és aggregátumok szilárd kristályrészei közé szorúlnak, ez a fajta kapcsolódás hozza létre a kakaóvaj háromdimenziós hálózatát.

A kakaóvaj polimorfizmusa, a különböző kristályformák előfordulása nagy hatással van a csokoládé és az édességek minőségére. A kakaóvaj fázis viselkedésének alapos ismerete szükséges a gyártási folyamatok optimalizálásához és a termék minőségének megőrzéséhez. A késztermék minőségét nagyban befolyásolja a forma hőmérséklete, a massa formába adagolásakor. Ha a forma túl meleg, akkor a határfelületen lévő csokoládémassza megolvad,

a megolvadt rész pedig úgy fog később kristályosodni, mint a nem temperált csokoládé. Ha pedig túl hideg a csokoládé, akkor néhány napon belül a csokoládé elveszíti a fényességét. (Löser és Tscheuschner, 1981)

3.2.4. Temperálás

A temperálás a csokoládé minősége szempontjából az egyik legfontosabb eljárás a gyártás során. Célja, hogy V kristályformákat hozzanak létre, amely rendkívül stabil, és a csokoládé kedvező tulajdonságait eredményezi, mint a fényesség, törésre roppanás, megfelelő viszkozitás. (Afoakwa, 2008)

Első lépésként a csokoládét 50 °C-ra melegítjük, így a hőmemória törlődik, és az összes zsírkristály kiolvad, ezután a csokoládét le kell hűteni 27 °C-ra, ekkor instabil IV és stabil V kristályok keletkeznek. Ha így hagyjuk a csokoládét, akkor átalakulnak IV kristályformák V formává, de ezt az átalakulást zsírvirágzás kíséri. Ezért a hőmérsékletet ismét megemelik 30-32 °C-ra, ekkor az instabil IV formájú zsírkristályok elolvadnak, és az így kapott csokoládé termodinamikailag stabil kristályszerkezetű lesz. (Lanaro et al., 2019)

Mantell és munkatársai (2015) szerint az olvadási pontja az V kristályformáknak 33.8 °C és 35°C között van.

Kleinert (1997) nyomán a temperálást, mint előkristályosítást, egymás után többször meg kell ismételni, így az étcsokoládé hőállóképessége 35 °C-ra emelhető, ezzel a késztermék keményebbé válik.

3.2.5. Kristályosodási sebesség növelése

A hagyományos úton való temperálás nagy mennyiségű energiát igényel, emiatt úgynevezett beoltós módszert használnak, amivel idő is megtakarítható. Az olvadt csokoládé beoltása a kakaóvaj kristályosodási sebességét nagymértékben javíthatja, mivel a folyékony halmazállapotú triacilglicerinek jól tapadnak a fejlődő kristályfelülethez, ahelyett, hogy új magokat hoznának létre. Az V kristályformájú szilárd, polimorf zsírkristályok beoltó magként szolgálnak, ezeket érintkezésbe hozzák a még folyékony halmazállapotú trigliceridekkel, ezek pedig felveszik ugyanazt a polimorf kristályállapotot, mint a beoltott magok. Először a csokoládét felmelegítik és megolvasztják, majd ismét lehűtik 32 °C-ra. Majd az oltókristályok hozzáadásra kerülnek miközben a csokoládét keverik. A csokoládé

ezen keverékét olyan hőmérsékletre kell hozni, ahol a termodinamikailag instabilabb formák folyékony halmazállapotúak, míg a stabilabb V és VI formák már szilárd halmazállapotúak a beoltott magvakban. Legjobb kristályosítási eredményeket nagy koncentrációjú V és VI formájú oltókristályok segítségével érhetőek el, amit por formában adnak hozzá, méretük 150 μm , mindeközben nyíróerőket alkalmaznak. Az oltással történő temperálás egyszerűbben kivitelezhető, könnyebben szabályozható. (Lanaro et al. 2019)

A megfelelő összetételű, polimorf magvak nagyobb valószínűséggel segítik elő a kristályosodást. Kísérletezés során Sato és munkatársai azt tapasztalták, hogy a kakaóvaj triacilglicerinei közül a β -trisztearin a kakaóvaj kristályosodásának sebességét számottevően nem folyásolta be, míg a rac-palmitoil-sztearoil-2-oleoil-glicerin β -formája igen. (Podchong et al., 2022)

Buscato et al. (2018) szerint további sztearinsav hozzáadása okozta az V formájú kristályok növekedését, míg a szorbitán-monosztearát egy olyan 3D hálózat létrehozását segítette, amelybe az olvadt kakaóvaj hatékonyan épül be. Mindkettő együttesen javította az étcsokoládé ellenálló képességét a zsírvirágzásokkal szemben.

Chen és munkatársai (2021) felfedezése szerint, a finomított kakaóvajhoz és étcsokoládéhoz 0,1 tömegszázalékos koncentrációban telített foszfatidil-kolint és foszfatidil-etanol-amint adva nemcsak a kívánt V-es polimorf stabilizálódott, hanem a kristályosodás sebessége is nőtt.

3.3. A csokoládé textúrája

Hao és munkatársai (2019) nyomán a csokoládé fizikai állapota kolloidkémiai szempontból egy olyan durva szemcsés diszperziós rendszer, amelyben a zsír, mint diszperziós közeg van jelen. A diszperziós közegben, vagyis kakaóvajban eloszló cukor, kakaó és tej szárazanyagok a diszperziós fázis. A diszperziós fázis nagy része 20-30 μm átmérőjű, 40-60 μm az átmérők egy része, elenyésző mennyiség 15 μm alatti szemcseátmérőjű. Kis mennyiségű nedvesség és levegő is diszpergálódik ebben a rendszerben, így a csokoládé egy összetett heterogén diszperziós rendszer. Amikor a csokoládé megolvad, a finom, szilárd részecskék szuszpenzió formájában diszpergálódnak a folyékony zsírban.

Különböző plazmidok immobilizálódnak a rácsok között, amikor a csokoládé megszilárdul, mert a zsír átkristályosodik, és szabályos rácsot alkot, emiatt a csokoládé 40 °C felett folyékony keveréknek tekinthető, ami szobahőmérsékleten szilárd. Ennek a szilárd

halmazállapotú keveréknek a szilárd fázisai sima, finom plazmidokká oszlanak el, a zsírral erősen diszpergált emulziót képeznek, ebben a formában a szilárd szemcsék a nyelvvel nem érzékelhetőek. (Hao et al., 2009)

A csokoládé legfontosabb összetevője a kakaóbabból származó kakaóvaj. A kakaóvaj kakaó aromájú és kis plasztikus tartományú. A csokoládétermék 27 °C alatt szilárd, és 27,7 °C felett olvadni kezd, ha a hőmérséklet tovább emelkedik, a csokoládé gyors olvadásba kezd, és mire a hőmérséklet eléri a 35 °C-ot teljesen megolvad, tehát hőérzékeny. A zsír természete és típusa nagy hatással van a hőérzékenységre. (Hao et al., 2009)

A MAGYAR ÉLELMISZERKÖNYV (2010) a kakaóvaját olyan zsírként határozza meg, amely a kakaóbabból vagy kakaóbab részekből nyerhető ki. A kakaóvaj szabadzsírsavtartalma, olajsavban kifejezve maximum 1,75%; legfeljebb 0,5% el nem szappanosítható anyagot tartalmaz (kivételt képez a préselt kakaóvaj, aminél 0,35% a megengedett mennyiség).

A kakaóvaj minőségére a kakaóbab-termelés környezeti és az éghajlati tényezői hatással vannak, például a Brazíliában termesztett kakaóból nyert kakaóvaj puhább, míg a maláj származású keményebb. (Storgaard, 2000) A kakaóbab termelése éghajlati tényezők miatt korlátozott, így az elérhető kakaóvaj mennyiség is korlátozott, ennek eredményeként a kakaóvaj számos helyettesítője van a piacon. A kakaóvaj helyettesítőit három nagy csoportra bonthatjuk: laurinsav típusú kakaóvaj-helyettesítő, nem laurinsav típusú kakaóvaj-helyettesítő és kakaóvaj-egyenértékű zsírok. Ezek közül a kakaóvaj-egyenértékű zsír úgynevezett mesterségesen előállított kakaóvaj, amelyeket természetes növényi zsírokból állítanak elő. A triglicerid három zsírosszetevője nagyon hasonló a valódi kakaóvajéhoz, emiatt nagyon hasonlóan viselkedik. A gyorsan olvadó szintetikus sztearin a kakaóvaj egyik típusa. Bár a trigliceridek tartalma jelentősen eltér a természetes kakaóvajétól, fizikailag hasonló tulajdonságú. Az olvadási görbék is közel azonosak. A laurinsav típusú kakaóvaj fő zsírsavként laurinsavat tartalmaz, ami jó keménységű, törekeny és zsugorodó képességű. A kristályosodási folyamatuk gyors, a lipolitikus enzim gyorsan lipolízist okozhat, ami szappanos ízt adna az anyagnak. Míg a nem laurikus típusú kakaóvaj-helyettesítők mellett szól az, hogy szappanmentesek, erősen hőállóak, ízük visszafogott és viaszos állaguk van.

A kakaóvaj alternatívák kimutatására Simoneau és munkatársai (1999) nagyfelbontású gázkromatográfiás (HRGC) analitikai módszert használtak sikerrel, de a használt zsír származása a kimutathatóságot befolyásolja, a legkevésbé kimutathatónak az illipe zsír bizonyult.

Matissek (2000) a kakaóvaj alternatívák kimutatását nagyfelbontású kapilláris gázkromatográfiával végezte (HT-HRGC), ezzel a módszerrel a zsírok triglicerid szerkezete vizsgálhatóvá válik.

Biczó-Kabai (2011) kutatási eredményei alapján, statisztikai módszerek használatával kimutatta, hogy a CBE és CBI zsírok 5%-ban való használata a csokoládé keménységét jelentősen befolyásolja, az idő és tárolási paraméterek függvényében.

3.4. A csokoládé viszkozitása és folyási paraméterei

A csokoládé előállítása és feldolgozása során a viszkozitás fontos fizikai mutató. A 3D nyomtatáson alapuló anyagelhelyezés folyamatosságának és gördülékenységének érdekében a csokoládénak folyékonynak kell lennie. A csokoládé viszkozitása a hőmérséklet függvényében változik. Az olvasztott csokoládé viszkozitása a hőmérséklet emelésével sikeresen csökkenthető. Ezenkívül a kakaóvaj mennyiségének növelésével a csokoládé kevésbé viszkózus lesz. Mivel azonban a kakaóvaj drága, a piacon lévő legtöbb csokoládéhoz emulgeálószeret adnak a viszkozitás csökkentése érdekében. Számos tényező befolyásolhatja a csokoládé reológiai tulajdonságait (ezáltal a csokoládéminőséget) mint például a zsírtartalom, emulgeálószer, szemcseméret. (Servais et al., 2003)

Afoakwa és társai (2008) megállapítása szerint a csokoládé mindegyik összetevője más termikus tulajdonságokkal rendelkezik, tehát a folyási paraméterei az alapanyagoknak különböznek.

3.5. A csokoládé reológiája

A reológia, vagyis folyadék áramlásának vizsgálata csokoládétermékek gyártási folyamatában fontos szerepet játszik. A reometria olyan vizsgálati módszer, melynek során műszer segítségével (reométerrel) egy pontos mérés történik, amely az anyagi rendszerre gyakorolt deformációs nyírósebesség és a keletkező nyírófeszültség viszonya alapján szolgáltatja a mérési adatokat. (Gasztonyi és Bogdán, 1985)

A csokoládé reológiai paraméterei a folyási tulajdonságok meghatározásához nélkülözhetetlen, ami a gyártandó csokoládé textúráját fogja előrejelezni. (Masen és Cann, 2018)

A csokoládé az összetett elrendezésű zsírösszetétel miatt, és a mikrostruktúráján belüli kölcsönhatások miatt komplex reológiai tulajdonságokkal rendelkezik. A csokoládé nyíróerők hatására kezdetben rendkívül viszkózus, ezt a tulajdonságát nemnewtoni és nyírásra lágyulónak nevezik. A legfontosabb paraméterek a reológiai vizsgálatokhoz a folyáshatár és plasztikus viszkozitás, amelyek a nyugalmi állapotban lévő és mozgás közbeni viszkozitást jelentik. Csokoládé készítése előtt fontos, a megfelelő viszkozitási profil megtervezése, a gyártani kívánt csokoládétermékre szabva. (Lanaro et al., 2019)

Attaie és társai (2003) kutatása eredményei alapján azt állapították meg, hogy a reológiai jellemzőket a tejpor zsabadzsírtartalma határozza meg a leginkább, más jellemzők mint a például a szemcsák alakja, vagy a mikrostruktúra kevésbé meghatározó.

3.5.1 A szemcseméret

Rendkívüli szerepe van a csokoládé viszkozitálásában. A csokoládé szemcséinek méretét őrlés során 30 μm , alá kell csökkenteni, ha ennél nagyobb a szemcseméret az a fogyasztó számára szemcsés érzetet fog kelteni kóstolásnál. Konsolás során fontos, hogy a felület folyékony halmazállapotú zsírral be legyen fedve, hogy a részecskék egymás mellett el tudjanak haladni. Általános szabály, hogy minél kisebbek a részecskék és minél nagyobb a felület, annál nagyobb erőre lesz szükség ahhoz, hogy a csokoládészemcsék nyíródjanak és elfolyjanak egymás mellett. A plasztikus viszkozitást ezért nagymértékben befolyásolja a csokoládében lévő részecskék mérete. (Beckett, 2008)

3.5.2. A kakaóvaj

A kakaóvaj szerepe a csokoládében, hogy a teret kitöltse a kakaó és cukor részecskék között, hogy azok el tudjanak haladni egymás mellett. A kakaóvaj a csokoládé kristályosodását és az olvadáspontját is befolyásolja. A csokoládé folyósabbá válik tőle, ami a plasztikus viszkozitás növekedésével mérhető, tehát a csokoládé viszkozitását a kakaóvaj növelésével vagy csökkentésével lehet szabályozni. (Afoakwa, 2010)

3.5.3 Emulgeálószer

Az emulgeálószer vagy felületaktív anyagok hasonló szerepet töltenek be, mint a kakaóvaj a csokoládében, vagyis a szilárd részecskékhez kötődnek, a plasztikus viszkozitást

csökkentik. Leggyakrabban lecitint használnak erre a célra, amelyből kevesebb mennyiség elég, mivel hatékonyabban köti meg a szilárd részecskéket, mint a kakaóvaj. Poliglicerinpolicinoleátot (PGPR) is szoktak használni, általában lecitinnel kombinálva. A PGPR egy ricinusból előállított emulgeálószer, ami a folyáshatár csökkenti, és a csokoládét newtoni folyadékká alakítja. (Beckett, 2008; Afoakwa et al., 2007)

3.5.4. Nedvességtartalom

A feldolgozás során az összetevők nedvességtől való megóvása is fontos, a csokoládé a lehető legkevesebb nedvességet kell tartalmazza. A konsolás első szakaszában nagy mennyiségben távozik nedvesség, de körülbelül 1% még a laktóz- és kakaórészecskékhez kötődik.

Valószínűleg a víz hatására történik a cukor részecskék agglomerálódása, 0,3% nedvességtartalomnál 1% kakaóvaj hozzáadása szükséges a viszkozitás helyreállításához, ezért is szükséges a nedvességtartalom minimalizálása, mert ezzel a hozzáadott kakaóvaj mennyisége csökkenthető. (Lanaro et al., 2019)

3.6. A csokoládé additív rétegyártása

Az additív rétegyártás (ALM), amelyet gyakran szilárd, szabad formájú gyártásnak vagy gyors prototípuskészítésnek is neveznek, egy olyan technika, amellyel rétegek egymásra helyezésével építik fel a terméket. Szükséges hozzá egy 3D tervezőszoftver és egy additív gyártóberendezés, ami az anyagot egymásra rétegezi.

Hao et al. (2019) nyomán az additív rétegyártás olyan technológia, amelynek előnye, hogy egyedi, magas minőségű, összetett tárgyak gyártására képes. Előnye még, hogy a hagyományos gyártással szemben kisebb munkaerőre van szükség, mivel kevesebb kézi megmunkálásra van szükség és a gépeket sem kell átállítani a különböző termékek gyártása között, ami általában időigényes folyamat. Az additív rétegyártás többféle technológiát foglal magába, mint a sztereolitográfiát, a szelektív lézeres szinterezést, a laminált objektumgyártást, a 3DP-t és az olvasztott lerakódásos modellezést. A különböző gyártási technológiák eltérő szintű kifinomultsági szintekkel rendelkeznek.

A csokoládétermék additív rétegyártás során úgy készül, hogy temperált folyékony csokoládét, amely körülbelül 38 °C-on viszkózus folyadék, formákba öntik. Majd ezután következik a hűtés, amikor a csokoládé zsír komponensei megszilárdulnak, ekkor a formát leválasztják és a csokoládé csomagolják.

Bár a csokoládétermékek többsége még mindig hagyományos technikákkal készül, Chen és Mackley, (2006); Engmann és Mackley, (2006) tanulmányai kimutatták, hogy a csokoládé hideg extrudálással is feldolgozható. Az extrudátumok kiváló átmeneti rugalmassággal és alaktartó tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik olyan formák előállítását, amelyekre a hagyományos csokoládégyártási technikák nem képesek. De az extrudátum félszilárd anyagként működik, ez azt okozza, hogy a rétegek egymáshoz nehezebben kapcsolódnak, így összetett tervek megvalósítása korlátozott.

Tekintettel arra, hogy a csokoládé nagyon összetett, számos összetevőből álló anyag, a prémium csokoládétermékek additív rétegyártással való készítése kihívásokkal teli folyamat, ahol az anyag jelenti a legnagyobb akadályt. Ha azt szeretnénk, hogy a késztermék rendelkezzen az összes kívánt íz- és megjelenési tulajdonsággal, akkor csokoládé kristályos fázisait szabályozni kell a leválasztás során. Ezenkívül a csokoládé egy nemnewtoni folyadék, így viszkozitása nem állandó, ez nehézséget okoz az anyag áramlási jellemzőinek megértésében, mivel a nyírófeszültség és a nyírási sebesség közötti kapcsolat nem lineáris.

4. Következtetések

4.1 A csokoládé 3D nyomtatása

A 3D nyomtatási technológia alkalmazási területe gyors ütemben, folyamatosan bővül a gyorsléptékű fejlesztések következtében. Ebből adódóan a csokoládé 3D nyomtatásának alkalmazási köre is egyre inkább bővül. A technológia legnagyobb kihívását a csokoládé extrudálási paramétereinek megtervezése jelenti, a csokoládémassza nagy viszkozitása miatt.

Csokoládé 3D nyomtatót először 2011-ben készítettek, és 2012 óta érhető el a piacokon. A fejlesztések többnyire a nyomtatási paraméterek javítására összpontosultak, ami lehetővé tette a harmadik generációs csokoládénymotatók megjelenését. Az új generációs nyomtatók asztali használatot, egyszerűbb működést és az öntési hatékonyságának növelését tették lehetővé.

3D csokoládé nyomtatással ehető, háromdimenziós tárgyak készítése lehetséges a kívánt szerkezet és geometriai forma szerint, mindezt extrúziós művelettel és számos réteg fokozatos egymásra helyezésével érhető el, ezzel ellentétben a hagyományos gyártásnál a csokoládémassza egy adagban kerül lehelyezésre. A nyomtatási folyamat során egy időben különböző jelenségek játszódnak le, mint például a nem newtoni folyadékáramlások, hőátadás, szinterezés a rétegek között, a lehelyezés után a tárgy megszilárdulása. (Rando és Ramaioli, 2021)



1. ábra : Csokoládé alapú tintával 3D nyomtatással nyomtatott szerkezetek fotói (a–f)
(Karyappa és Hashimoto , 2019)

Lanaro és munkatársai (2019) nyomán a 3D ételnyomtatást gyakran intelligens ételnyomtatásnak is nevezik, mivel a technológia fejlődésével az intelligens ételmiszerek 3D nyomtatója magánszakácsként szolgálhat otthonok, szállodák és egyéb létesítmények számára. Ezenkívül egyedi étrendi igényeknek megfelelően nyomtathatóak vele az ételmiszerek, a technológia elterjedésével a digitális ételmiszerek 3D nyomtatási korszaka veheti kezdetét.

Mivel jelenleg a 3D csokoládé nyomtatás hatékonyságának növelése érdekében számos akadályt kell még leküzdeni, ezért kutatások célja egy könnyebben hordozható, kompakt, a folyékony csokoládé speciális reológiai tulajdonságaival könnyen megküzdő 3D nyomtató megalkotása, amely lehetővé teszi a csokoládé egyszerű és precíz hozzáadását a készülékhez. A 3D csokoládényomtatás több iparág összeolvadását eredményezheti, amely

azt jelentené, hogy a csokoládégyártás zöme többé nem korlátozódna a csokoládégyárakra és -üzemekre.

A háromdimenziós nyomtatás vagy additív gyártás X-Y-Z derékszögű portálrendszer használatával vezérelhető. A technológia nagy előnye az összetett formák gyártása, amelyeket a nagyfokú ellenőrzés teszi lehetővé, erre jelenleg más módszerek nem alkalmasak. Hátránya ennek a technikának, ami a gyártási idő hosszúsága, és ez függ a gyártani kívánt termékhez szükséges rétegek számától, a nyomtatási paraméterek mennyiségétől, az extrudálás sebességétől, vagy az X-Y-Z portáltól. Egyelőre a hagyományos gyártás leváltására a 3D nyomtatás időbeni korlátok miatt nem alkalmas, de piaci rések megtalálása lehet célkitűzés alkalmazására, mint például összetett objektumok létrehozása.

A 3D nyomtatással készült termékek létrehozása számítógépes tervezéssel történik, úgynevezett CAD tervezőszoftver segítségével, amellyel a gyártani kívánt termék számos aspektusa optimalizálásra kerül. Amikor nyomtatásra kész egy megtervezett objektum, akkor .stl formátumban kerül mentésre a tervezőszoftverben, és a nyomtatószoftver felületére viszi át. A nyomtató szoftver a nyomtatni kívánt objektumokat rétegekre bontja, és a parancsokat maga a nyomtató hajtja végre.

A 3D nyomtatószoftveren keresztül különböző paraméterek állíthatók be, mint a rétegmagasság, sebesség, hőmérséklet, kitöltés és héjvastagság. Az elkészült terv és a beállított paraméterek exportálásra kerülnek egy G-kód formátumban, ami a 3D nyomtatóra helyezhető. A 3D nyomtató a parancsok soros listáját hajtja végre, amiket G-kódoknak neveznek, ezek a kódok jelzik a nyomtatónak a polimer lehelyezésének helyét és idejét.

A sikeres 3D csokoládényomtatás érdekében a nyomtatási paraméterek precíz beállítása szükséges, Rando és Ramaioli (2021) kísérletei szerint a nyomtatásnak a kritikus nyomtatási sebesség (V_p) értéke alatt kell történnie, ami a környezeti hőmérséklettől (T_e) függ, miszerint, ha a $T_e = 18\text{ °C}$, akkor a V_p 16 mm/s alatt tartandó. Valamint, ha a környezeti hőmérséklet 20 °C , akkor a nyomtatási sebességet 8 mm/s alatti érték alatt kell tartani. Ezek az értékek megfelelő nyomtatási körülményeket biztosítanak a kakaóvaj hűtéséhez és megszilárdulásához, ami a nyomtatás stabilitásához szükséges.

4.1.1 3D nyomtatás extrúzióval

A csokoládé extrudálásának története 1920-ra nyúlik vissza, amikor Laskey foglalkozott először a csokoládé félig szilárd állapotban lévő kidolgozásával, és ekkor fedezte fel, hogy a csokoládé ilyen állapotban extrudálásra alkalmas nagy nyomáson. Majd csak 1994-ben Mackley és munkatársai foglalkoztak a félig szilárd csokoládé izotermikus, olvadáspont alatti hőmérsékletű extrudálásával, amikor rájöttek, hogy közvetlenül az extrudálás után az extrudátum átmeneti rugalmasságú és alaktartóképes.

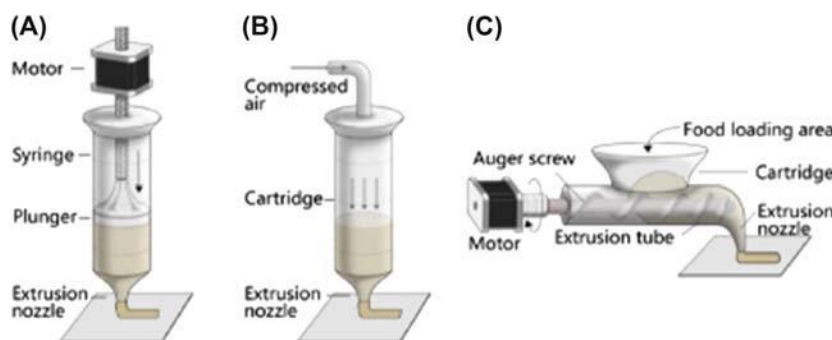
Az extrudálási gyártástechnológiákat FDM (fused deposition modeling) és FFF (fused filament fabrication) rövidítésekkel jelölünk, ezeket szálhúzásos rétegmodellézként vagy rétegnyomtatásként lehet fordítani. Az FDM technológia segítségével félszilárd anyagok extrudálása lehetséges, az FDM készülékeket meleg extrudálásra használják. (Thangalakshmi, 2021)

Ezzel a technológiával kifejezetten csokoládégyártásra szánt berendezést 2009-ben hoztak létre egy mesterképzésben résztvevő hallgatók csoportja, akik a berendezést kereskedelmi alkalmazására szánták. (Causer et al., 2009)

A 3D extrúziós technológiával összetett élelmiszer-objektumok nyomtatására van lehetőség, az FDM a 3D népszerű kereskedelmi nyomtatási módszerhez hasonló. Az FDM és FFF nyomtatási módszer azon alapul, hogy egy izzószálat a fogaskerekek segítségével egy fűtőberendezésre húznak, majd a gyűjtőlemezre extrudálják. Csokoládé nyomtatásakor nyomtatás előtt a teljes csokoládémennyiséget fel kell melegíteni, amelyet a fecskendőbe helyeznek. A fecskendő használatával élelmiszerminőségű termékek gyárthatók, mivel a tároló rész egyszerűen cserélhető. Az élelmiszert megfelelő nyomáson egy kis tűn keresztül lehet nyomni a 3D nyomtatórendszeren keresztül, ami hátrányt jelent, mivel a nyomtatási folyamat ideje emiatt hosszú. (Lanaro et al., 2019)

Lanaro és munkatársai (2017) az olvadó extrudálást tanulmányozták komplex csokoládémodellek nyomtatásához gépi tervezéssel, hogy egy szilárd halmazállapotú anyagot készítsenek. Munkájuk során két kulcsfontosságú tervezési területet tártak fel: az egyik az extruder szerelvény minél merevebbé tétele, hogy minimalizálják a meghajlást és precízebb lehelyezéssel történjen az extrudálás; és másik az aktív hűtőrendszer kialakításának optimalizálása, hogy a csokoládé beoltása alacsonyabb hőmérsékleten történjen.

Az élelmiszerek 3D nyomtatásakor extrúzió közbeni hőmérséklet szabályozása alapvető paraméter, mivel az olvadási és áramlási tulajdonságait befolyásolja a nyomtatni kívánt anyagnak, a csokoládé esetében 32 °C az optimális hőmérséklet extrúzióhoz, mivel ez a hőmérséklet szükséges ahhoz, hogy a csokoládé minősége szempontjából fontos stabil kristályok megmaradjanak. Az extrúziós hőmérséklet anyagonként változó, mivel minden anyag más hőtani tulajdonságokkal rendelkezik. (Mantihal et al, 2019)



2. ábra: Anyagok extrudálási mechanizmusai (A) Fecskendő alapú extrudálás, (B) levegőnyomással hajtott extrudálás és (C) csavaros extrudálás (Sun et al., 2018)

4.1.1.2 Hideg extrúzió

A hideg extrúzió egy olyan kíméletes extrúziós eljárás, amely többnyire szobahőmérsékleten történik. A hideg extrudálás alapvető előnye, hogy lehetővé teszi az összetett formák folyamatos előállítását, ami korábban a hagyományos fagyadékfeldolgozási eljárásokkal kihívást jelentett. Az élelmiszeriparban legtöbbször teszták, de olyan anyagok, mint cukorkák, fagyalt extrudálása is kivitelezhető egy nyomószár vagy csavar segítségével. Az alaktartó extrudálás érdekében a csokoládé hideg extrudálását egy feldolgozási ablakon belül, azaz 18 °C és 28 °C közötti hőmérsékleten hajtják végre. A csokoládé körülbelül 18 °C alatti hőmérsékleten és magas nyomáson morzsalékos masszaként extrudálható, míg körülbelül 28 °C feletti hőmérsékleten az extrudált anyag megolvad, az alakzat deformálódik. (Chen és Macklay, 2006)

A csokoládé hideg extrúzója során a hőmérséklet fűtési rendszerrel szabályozható, így a csokoládé temperálása is lehetséges. A jelenleg használt 3D csokoládé nyomtatók esetében egy alapfecskendőt használnak, amibe a csokoládét helyezik, egy elektromos motor végzi az extrudálást, ami lineáris mozgással irányítja a dugattyút. Az extrudálófejet a portálrendszer

mozgatja, így a csokoládé a megadott mennyiségben az ágyra helyeződik a rétegek egymásra épülésével mindaddig, amíg az objektum fel nem épül. A dugattyús módszer esetében, magasabb hozamú viszkozitással az extrudálófejben ellennyomás léphet fel, ami problémákat okozhat a csokoládé áramlásának elindításakor és befejezésekor. Ez akkor történik meg, ha például a dugattyú lineáris mozgást végez, de nincs extrudálás, ilyen esetben az ellennyomás akadályozza az extrudálást. Ennek oka lehet, hogy a csokoládé viszkozitása folyáshatár tartományba esik, és az erő rugalmas tárolása miatt az extrudálás egy időre leáll. A megoldás ilyen esetekben az emulgeálószer használata lehet, ami abban segíthet, hogy a viszkozitást csökkentse nyíróhígítással. (Lanaro et al., 2019)

A hideg extrudálás alapvető előnye, hogy lehetővé teszi az összetett formák folyamatos előállítását, ami korábban a hagyományos folyadékfeldolgozási eljárásokkal kihívást jelentett. (Chen és Macklay, 2006)

Lanaro et al. (2019) nyomán az úgynevezett „hideg extrúziós” csokoládék kivételes alaktartó tulajdonságokkal rendelkeznek, ami a csokoládé félig szilárd természetéből adódik. Engmann és Macklay (2006) kutatásai alapján kimutatták, hogy a csokoládé hideg extrudálása során meglágyult a megmunkálás által kiváltott fázisváltozások hatására, mivel a zsírkristálymolekulák megolvadnak, majd egy bizonyos idő alatt átkristályosodnak. Ez időintervallumban a csokoládé jellegzetes formatartó tulajdonságokat mutat. Russel és munkatársainak (2006) kutatásai pedig azt bizonyítják, hogy a tűn belüli magas nyírási sebesség az agglomerátumokat képes lebontani és a légbuborékokat összenyomni, ami egy nyomásérzékelővel mérhető. Az élelmiszerek nyomtatásra használt 3D nyomtatón használt nyomások alacsonyabbak, mint az iparban használatos extruderben.

A röntgendiffrakciós vizsgálatok során röntgensugarakat kristályokra vezetnek, a csokoládé esetében a kristallográfiai egységsejtszerkezet vizsgálendő. Megállapították, hogy csokoládénak hideg extrudálás során vagy azután változatlan, a kristályszerkezet V állapotban marad. Viszont a legújabb in situ vizsgálatok kimutatták, hogy a kristályos anyag frakciója csökken a hideg extrudálás során, majd extrudálás után visszaáll az eredeti értékére a kristályfrakció. P-NMR vizsgálatok kimutatták, hogy a folyékony zsírfrakció hidegen extrudált csokoládé esetében az idő előrehaladtával csökken, és hogy a folyékony zsírfrakció megnövekedése okozza a csokoládé átmeneti rugalmasságát. A folyékony fázis elhelyezkedése nem ismert a kakaóvaj mikrostruktúráján belül. (Chen és Macklay, 2006)

Amikor a kristályos kakaóvajzsír folyékony zsírfázisba lép, ekkor történik meg az anyag mechanikai tulajdonságainak változása. Korábban azt feltételezték mechanikai hatásra

növekszik meg ekkor a csokoládé hőmérséklete, ami akár 3 °C-kal emelkedhet rövid időn belül, körülbelül 2-3 perccel az extrudálás után, de ma már tudjuk, hogy ennek oka az extrúziós átkristályosítás során keletkezett folyékony zsírfeleslegnek köszönhető. Mivel a mechanikai tulajdonságok fázisszerkezettel összekapcsoló kvantitatív modellét még nem sikerült felállítani, ezért a jövőben valószínűleg olyan kísérleti módszerek kidolgozására lesz szükség, amelyek képesek kimutatni a kakaóvaj nanoméretű szerkezetében bekövetkező változásokat. (Chen és Macklay,2006)

Stratégiai szempontból a hideg extrudálásnak számos előnye van, mivel túlnyomórészt izoterm a folyamat, így közel tökéletes plasztikus extrudálási reakció megy végbe, tehát nincs hatással az extrudálási nyomásra az extrudálási sebesség. Az extrudátum alaktartó, nagy pontosságú objektumok nyomtatására alkalmas. (Lanaro et al., 2019)

Ha 26 °C-nál magasabb az extrudálási hőmérséklet, akkor összefüggés lép fel az áramlási nyomás és az áramlási sebesség között. Ennek leírására egy tökéletes plasztikus konstitutív modell használható, amely a csokoládé folyási viselkedését mutatja. Ebben a modellben az anyag nyírófeszültsége a hőmérséklettől és a fajlagos csokoládétartalomtól függ, de független a nyírási sebességtől. A tejsokoládéhoz alacsonyabb extrudálási nyomás szükséges, mint az étcsokoládéhoz, és mindkét csokoládétípus folyási nyomása független a dugattyú sebességétől. Az extrudálási nyomást jelentősen befolyásolja a zsírfázis mennyisége, a magas zsírfázis alacsonyabb extrudálási nyomással hozható összefüggésbe. A csokoládében lévő folyékony vagy szabad, mobilis zsír mennyiségének aránya befolyásolja, hogy az extrudálási nyomást milyen mértékben befolyásolja az összetétel. A tejsokoládét a magas tejszírkoncentráció miatt egyszerűbb extrudálni, mint az étcsokoládét azonos hőmérsékleten, mivel a tejsokoládé több folyékony zsírt tartalmaz. (Chen és Macklay, 2006)

4.1.1.3 Az extrúzió fontosabb paraméterei

Extrúzió

A nyomtatófej a dugattyú általi lineáris mozgása során lineáris elmozdulásának mértékével mérhetjük.

Extrudálás térfogata

Az extrudálás általában, úgy van kialakítva, hogy egy egyenlő átmérőjű anyaggyöngyöt extrudáljon, de egy meghatározott szélesség és magasság is meghatározható, ha lapított kört szeretnénk kapni.

A tű átmérője

A nyomtatás idejét és sebességét meghatározza.

A mozgási sebesség

Ha a sebesség túl nagy, akkor a nyomtatott anyag vékonyabb átmérőjű lesz, mint a tű, és végül a felületi feszültség a szál csomósodását okozza majd. Ha pedig túl alacsony, akkor az extrudált anyag mennyisége lényegesen több lesz a számítottnál, így a végeredményként kapott nyomtatott tárgy kevésbé lesz esztétikus.

Rétegmagasság

A 3D nyomtatott objektumok minden rétege között jól felismerhetőek a laminálási vonalak, ezek csökkenthetők kisebb rétegmagassággal, vagy későbbi fűtési művelettel lehet eltávolítani őket.

4.1.1.4. Extrudálás utáni mechanikai jellemzés

Macklay és Chen (2016) nyomán az extrudálást követően vett minták rugalmasságának vagy keménységének mértékét különféle tesztekkel értékelték, beleértve a kocka kompressziót, a penetrometriát és a sugárhajlítást. A tesztek eredményei általában azt mutatták, hogy az extrudálás utáni idő meghosszabbításával az anyag rugalmassága csökkent, keménysége pedig nőtt. Az extrudálás során keletkező folyékony zsír újrakristályosodását az extrudált termék keményedésével hozták összefüggésbe.

A mechanikai vizsgálatok eredményei arra a következtetésre vezettek, hogy az átkristályosodási folyamat két szakaszban ment végbe, az első egy gyors, rövid távú szakasz, a második pedig lassabb, hosszabb kinetikájú szakasz. Mind a rugalmasság, mind a keménység egy kezdeti gyors átmenetet, majd egy lassabb átmenetet követett az

utófeldolgozott állapotban. Az extrudálás sebességét és hőmérsékletét gondosan kell megválasztani, mivel az extrudálás utáni jellemzőkre ez hatással lesz.

A vizsgálatok azt is kimutatták, hogy az anyag rugalmassága először növekedést mutatott, amikor az extrudálási sebesség és a hőmérséklet a hideg extrudálási feldolgozási hőmérsékleti tartományon belül megemelkedett. Mivel mindkettő paraméter növeli az extrudált minta folyékony zsírtartalmát, ez azt jelenti, hogy szignifikáns összefüggés van a folyékony zsír koncentrációja és a már extrudált csokoládé mechanikai jellemzői között.

4.1.1.5 3D extrúzió folyamatoptimalizálása

A 3D nyomtatás egy összetett folyamat, az nyomtatandó anyag tulajdonságainak és a nyomtatási paramétereknek pontos ismerete szükséges ahhoz, hogy a 3D objektumot pontosan a terv szerint ábrázolhassuk.

Lanaro és munkatársai (2019) nyomán számos módszer használható a csokoládé nyomtathatóságának javítására, beleértve a hőmérséklet-szabályozást az extrudálás során, a csokoládé szemcseméretének optimalizálását és az adalékanyagok hozzáadását. A hőmérséklet szabályozása a stabilabb kristályok növekedését segíti, így a textúrája a csokoládénak javul, fényesebb és törésre roppanósabb lesz a késztermék. A csokoládé szemcseméretének csökkentésére a reszelési eljárás az egyik alternatíva, ami felgyorsítja az olvadást a nyomtatás során.

Hamilton és munkatársai (2018) szerint a hőmérséklet mellett, az extruder nyomása is befolyásolja a nyomtatási sebességet, ha a hőmérsékletet megemeljük, akkor az az extrudált anyag reológiai tulajdonságainak megváltozásával fog járni. Optimális nyomtatás akkor érhető el, ha a fúvóka átmérője megegyezik a rétegmagassággal.

A 3D nyomtatás teljesítménye számos adalékanyaggal javítható, például hidrokolloidokkal (fehérjék és szénhidrátok), keményítőkkal és cukrokkal. A segédanyagok az áramlási, ülepedési és kenési tulajdonságokat javítják. (Cohen et al., 2009)

Kikuta és Kitamori (1994) megállapítása szerint az egyik ilyen adalékanyag a magnézium-sztearát ($C_{36}H_{70}MgO_4$), amelyet gyógyszerekben térfogatnövelőszerként, és síkosító tulajdonsága miatt használják. A magnézium-sztearátot mint emulgeálószer, legfeljebb 5 tömegszázalékos mennyiségben lehet hozzáadni a csokoládéhoz. Faqih és társai (2007) megállapították, hogy ez a hozzáadott só javítja a keverék folyási tulajdonságait és síkosító tulajdonságait, mivel megakadályozza, hogy az anyagok a nyomtatótölcsérhez vagy a forgó

csigákhoz tapadjanak. A magnézium-sztearát bizonyos mennyiség alatt, emberi fogyasztásra alkalmasnak bizonyul, mivel nincs ismert mellékhatása. Mantihal és munkatársai (2019) kísérletei is bizonyították, hogy a magnézium-sztearát extrudálás során a csokoládé folyása javult, mindeközben az adalékanyag a csokoládé termikus tulajdonságait nem változtatta meg.

Az extrúzió során lerakódott szálaknak számos követelménynek kell megfelelni, ilyen az esztétikai megjelenés, a formamegtartási képesség és annak a képessége, hogy elbírja saját súlyát. Ezt a rétegmagasság, az extrudálás, a mozgási sebesség, a fúvókamérete és hűtési paraméterek optimalizálásával érhetőek el.

A formatartóképesség javításában a számítógéppel segített tervező szoftver (CAD) fontos szerepet játszi, mivel a lerakott rétegek alátámasztó képességének optimalizálását is végzi. Mivel a komplex 3D szerkezetek tervezéséhez támasztékok szükségesek, különösen igaz ez, ha a szerkezet anyag nélküli üregeket is tartalmaz. Ezeket a támasztékokat különböző módon lehet elkészíteni, például kereszt vagy párhuzamos szerkezeti kialakításúak lehetnek. (Mantihal et al, 2017)

A csokoládényomtatás minőségének biztosítása a nyomtatás során bonyolult, mivel számos paramétert kell figyelembe venni. Az extrudálás magasságát úgy határozták meg, vagyis fúvóka és a tárgyasztal közötti távolságot, hogy a magasságot addig változtatták, ameddig a szál el nem kezdett laposodni, ami annak a jele, hogy ilyenkor a csokoládé szál a fúvóka és a tárgyasztal közé préselődik. A sebesség optimalizálása úgy lehetséges, hogy a szál átmérőjét a fúvóka átmérőjéhez kell hasonlítani, és ezeknek meg kell egyeznie. De ma már a legújabb nyílt forráskódú kereskedelmi 3D nyomtatókhoz kifejlesztett szoftvereknek köszönhetően, a nyomtatási paraméterek beállítása már automatikus, tehát hozzárendelik a nyomtatáshoz szükséges változó értékeket. Eszerint a fúvóka és a tárgyasztal közötti távolságot is képes beállítani, így a csokoládészál azonos átmérőjű lesz a fúvóka átmérőjével. Bridging (hidalás) egy általánosan elterjedt kifejezés a 3D nyomtatásban, ami azt a távolságot jelenti, ami alátámasztás nélkül ível át a két támaszpont között az anyag. Ezzel a szálak önmegtartó képességének kapacitása tesztelhető. A mozgási sebesség (egyenlő hengeres szállal) nincs hatással a hidak nyomtatható távolságára, és egy 0.8-szoros kinyomási érték (extrusion multiplier) a hidak távolságát növelheti.

A 3D nyomtatás egyik alternatív módja lehet a simított részecske hidrodinamikai modellezése.

A magas viszkozitás és a lassú befecskendezési sebesség kedvez az olyan tárgyak előállításának, amik alakjukat megtartják. A magas folyáshatár a deformálódás esélyét

csökkenti a csokoládé nyomtatása esetében, de ezt a valóságban nehéz kivitelezni, mivel egy alacsonyabb viszkozitással jobb az anyagáramlás.

4.1.2 3D csokoládényomtatás szinterezéssel, kötéssel

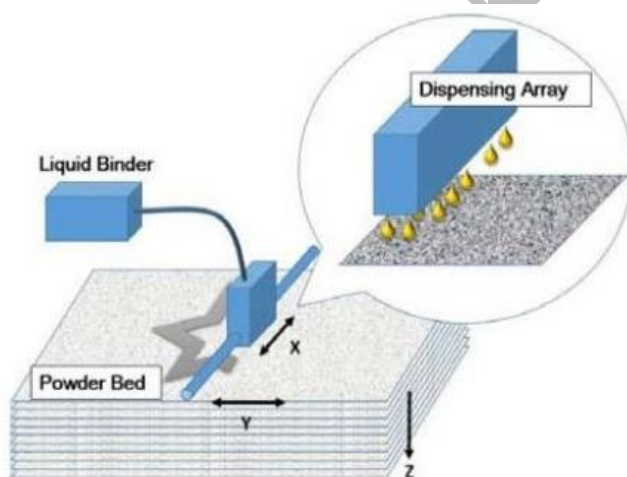
Összetett csokoládé termékek készíthetők 3D nyomtatógéppel, valamint szinterezési és kötési eljárásokkal, ez egy viszonylag gyorsabb eljárásnak számít. Forró levegővel vagy lézerrel por szinterelhető össze, így a szinterezési folyamat során konglomerátum keletkezik. A kötés során a por megkötésére folyadékot használnak. Mindkét technika a poron belül bizonyos mélységig hatásos, emiatt az additív gyártási folyamat során rétegenként por kerül lehelyezésre. A szinterezéssel vagy kötéssel előállított részek porágyban vannak megtámasztva. Ez lehetővé teszi bonyolultabb dolgok nyomtatását, de szükség van később egy poreltávolítási utófeldolgozási eljárásra is, de mivel ez adagokban végezhető, ez a termelékenységet nem feltétlenül fogja befolyásolni.

Kötéses gyártási technológiával úgynevezett kötőanyag-sugarak, modellek hozhatóak létre úgy, hogy egy kötőanyagot alkalmaznak a porrétegek összeolvasztására. Kisebb, egyenként 100 mikrométernél kisebb átmérőjű kötőanyagcseppek ismételt lerakódnak a porágy felületén a nyomtatófej segítségével, amely a szkennelési minta alapján van irányítva. A folyékony kötőanyag felvitelét követően a porágy teljes felületét a kívánt hőmérsékletre melegítik, ezt jellemzően hőlámpával, hogy a sorban következő réteg megkapja a szükséges mechanikai szilárdságot ahhoz, hogy ellenálljon a szétterítésben járó nyíró- és gravitációs nyomóerőknek, illetve az azt következő rétegekkel szemben is szilárd legyen. Az egyes rétegek lépései addig ismétlődnek, amíg a nyomtatandó tárgy be nem fejeződik. A porított anyag és a kötőanyag tulajdonságai kulcsfontosságúak az alkatrészek sikeres előállításához ezen nyomtatási technológia alkalmazásakor. A felületi feszültségnek és a tinta sűrűségének megfelelő minőségűnek kell lennie a kötőanyagban, amelynek alacsony viszkozitásúnak kell lennie, hogy megakadályozza a fúvókákból való szétterülést. (Pitayachaval1 et al., 2019)

Lanaro és munkatársai (2019) nyomán az élelmiszerporok agglomerálására számos technika használható. Többek között nyomással, extrudálással, újranedvesítéssel, porlasztóágyas szárítással, gőzsugárral történő szárítással, hőkezeléssel/szinterezéssel és a kötőanyagokkal történik. Az agglomeráció a szemcsés szilárd anyagok adhéziónak leírására használt kifejezés, amelyet kémiai vagy fizikai erők idéznek elő a szilárd felület fizikai vagy kémiai

módosulása következtében. A szinterezés az anyag olvadáspontja alatt megy végbe, ahol a teljes szabad felületi energia csökkenése miatt a por porózus módon csomósodik össze. Számos folyamat vezethet megkötéshez (binding), de a nedves granulálás hatására a részecskék mérete megnő, és összeérve konglomerátum keletkezik.

Az egyik legkorábbi szinterezést alkalmazó 3D-s élelmiszernyomtató rendszer olcsó és könnyen hozzáférhető alkatrészekből készült, hogy a nagyközönség számára is használható legyen. Oskay és Edman (2009) először forró levegőt és a cukrot szinterelték a rendszerben, hogy különféle cukor objektumokat állítsanak elő. Kísérleteik alapján kimutatták, hogy a platform pontossága növelhető egy precízebb fej kifejlesztésével, amely pontos arányban képes szállítani a forró levegőt. Majd később bebizonyították, hogy például nagy sűrűségű polietilén is szinterezhető ugyanazon a nyomtatón. A porágyas 3D nyomtatási technológiákban használt élelmiszeranyagokat szigorú receptúra alapján kell feldolgozni, hogy az agglomerációt lehetővé tegye.



3. ábra : 3D nyomtatás kötőanyag-kötéssel (Peng et al., 2015)

4.1.4. Inkjet technológiás 3D nyomtatás

Tintasugaras nyomtatásnak nevezik a különféle nyomtatási eljárásokat, amelyek során az anyag cseppek formájában kerül a termékre vagy a gyűjtőlemezre. Ennek a technológiának a legismertebb alkalmazása a nyomtató, amely a háztartásokban és irodákban is elterjedt készülék. Mint sok más additív gyártási folyamat során, az inkjet technológiás, azaz

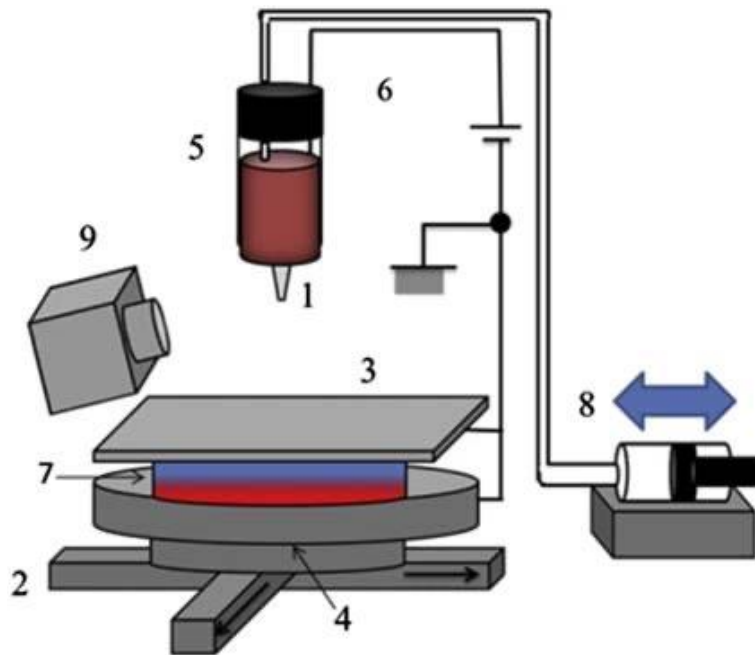
tintasugaras nyomtatás során is sok egymásra helyezett réteg építi fel a nyomtatott objektumokat. Az élelmiszeriparban általában arra használják, hogy például tortákra, süteményekre készítsenek díszelemeket.

Lanaro és munkatársai nyomán (2019) a nyomtatáshoz egy hőfejet használnak, ami cseppenként anyagáramot adagol a porágyra, ehhez a módszerhez általában termikus vagy piezoelektromos fejet használnak. A termikus tintasugaras nyomtató nyomtatófejét elektromosan melegítik, hogy nyomásimpulzusokat hozzon létre, melynek hatására a fűvókából a cseppek kiáramlását szabályozzák. A tintasugaras nyomtatási technikáknak két fajtája van: folyamatos jet nyomtatás és drop-on-demand nyomtatás. A tinta egy piezoelektromos kristályon keresztül folyamatosan távozik a folytonos sugárnyomtatóhoz rögzített frekvenciájú rezgéssel. Néhány vezetőképes vegyszert adnak a tintához, hogy a kívánt folyási képességet biztosítsák. Egy szelep szabályozza, hogy a megadott nyomáson mennyi tinta kerüljön ki a drop-on-demand nyomtató fejéből. Míg az előállított képek tisztasága és pontossága magasabb a drop-on-demand rendszerekben, mint a folyamatos jet rendszerekben, a nyomtatási sebesség általában lassabb. A tintasugaras nyomtató jellemzően alacsony viszkozitású anyagokkal dolgozik, ezért nem alkalmas bonyolult élelmiszer-szerkezetek létrehozására, csokoládé nyomtatására kiválóan alkalmas.

A folyamatos tintasugaras eljárás az anyag folyamatos csepegtetését jelenti, a nagy sebességű folyamatos tintasugaras nyomtatási technológiát az ipari termékek jelölésére használják. A portálrendszer használatával akár egyetlen csepp beütemezhető az adott időpontban és/vagy helyen. Ez az úgynevezett drop-on-demand, azaz igények szerinti nyomtatás. Az csepp ejtése indítható termikus, piezo vagy elektrosztatikus úton. A termikus eljárások lényege, hogy az anyag egy részét elpárologtatják, és buborékot hoznak létre, amely összeomlik, és egy nyomáshullámot hoz létre, amely cseppet rak le. A legnépszerűbb technológia piezo módszereken alapul, amely szerint az elektromos áram hatására módosítja az anyag formáját. A gyakorlatban nagyon leggyakrabban az elektrosztatikus erőket használják tintasugaras nyomtatáskor anyaglehelyezésre.

A többféle tintasugaras technológia miatt sokféle csokoládékompozíció használható ebben a technikában. Mivel a csokoládényomtatónak a csokoládét el kellene párologtatnia ahhoz, hogy a nyomtatás működjön, valószínűtlennek tűnik, hogy alkalmazható-e csokoládé esetében akár folyamatos tintasugaras, akár hőnyomtatósi módszert. Viszont Takagishi és munkatársai (2018) kutatásának eredményeként egy elektrosztatikus eszköz és a Hershey-féle héjfesték segítségével sikerült demonstrálni a csokoládé tintasugaras nyomtatását. A

tintasugaras nyomtatókban készült csokoládé a hagyományos módon készült csokoládé ízére hasonlít, ellentétben a porágyas technológiákkal szemben.



A tintasugaras elrendezés kísérletes vázlata (1: fúvóka; 2: x-y lineáris fokozat; 3: fémlemez; 4: z mechanikus állvány; 5: nyomdaanyag; 6: nagyfeszültségű készülék; 7: Peltier-eszköz; 8: nyomásmérő eszköz ; 9: mikroszkóp)

(Takagishi et al., 2018). (170.o)

4.2 3 D nyomtatás technológiáinak felhasználása és összegzése

Lehetőség van a csokoládé szerkezetének és reológiai jellemzőinek meghatározására és testreszabására az egyes gyártási folyamatokhoz. A háromdimenziós nyomtatás segítségével többféle megközelítéssel összetett 3D csokoládé termékeket lehet előállítani. Az extrudálás során hagyományos csokoládé készítmény használható, ahol a szerkezet temperálható, a viszkozitás finoman szabályozható. A porral borított ágyakon végzett szinterezés és kötés egyaránt gyorsan megváltozott csokoládéösszetételt igényel, amelynek magas cukor- és alacsony zsírarányúnak kell lennie. A csokoládétárgyak létrehozására szolgáló tintasugaras technikák főként a 2D-s nyomtatásra korlátozódnak, a jövőben azonban lehetségessé válhat összetett csokoládé tárgyak tintasugaras nyomtatással történő gyártása. A 3D nyomtatás egy

izgalmas technológia az élelmiszeriparban, és pozitív fejlődést hozott a csokoládéiparban, lehetővé tette a gyors, összetett 3D struktúrák létrehozását.

Az élelmiszer-anyagokat egy fúvókán keresztül extrudálják extrúzió alapuló nyomtatással, hogy rétegről rétegre építsék fel az élelmiszer-mintákat. A megfelelő anyagok ehhez az eljáráshoz a paszta és a szilárd alapú vegyületek alacsony viszkozitásuk miatt. A módszer feldolgozási paramétereinek közé tartozik a fúvóka átmérője, a fúvóka mozgási sebessége és a nyomtatófej magassága. A belépő szintű berendezések alacsony költsége, az alapanyagok széles választéka és a könnyű testreszabhatóság az előnye ennek a módszernek, míg az alacsony precizitás és a hosszú építési idő az extrúziós nyomtatás hátránya.

Az élelmiszer-összetevők egymás után kerülnek a porágy felületére egy fúvóka segítségével a kötőanyag-fúvósítás során. Az alacsony viszkozitás, az alacsony felületi feszültség és az alacsony tintasűrűség alkalmassá teszi a folyadék- és poralapú anyagokat ehhez a megközelítéshez. A módszer feldolgozási változóinak közé tartozik a fúvóka átmérője, a rétegvastagság és a nyomtatófej típusa. Habár ennek a módszernek nagyon gyors a gyártási sebessége, és automatikusan beépíti a tartószerkezeteket a réteggégyártásba, számos hátránya is van, beleértve a durva vagy szemcsés megjelenést, valamint az utófeldolgozás szükségességét a nedvesség eltávolítása vagy a kötőanyag-sugaras nyomtatott tárgyak szilárdságának növelésének érdekében.

Az élelmiszer-anyagokat a nyomtatófejbe helyezik a tintasugaras nyomtatáshoz, majd elektromosan melegítik, hogy nyomásimpulzusokat hozzanak létre, amelyek kikényszerítik a cseppeket a fúvókából. A nyomtatásnak két formája van: a drop-on-demand nyomtatás és a jet-nyomtatás. Az anyag alacsony viszkozitása miatt a folyékony alapú anyagok megfelelőek ehhez a módszerhez. A nyomtatófej hőmérséklete, a fúvóka átmérője és a nyomtatási sebesség a feldolgozási változók ennél a módszernél. Míg a tintasugaras nyomtatásnál felmerül az a probléma, hogy az utófeldolgozás potenciálisan károsíthatja a vékony és kis felületeket, ennek a technológiának az előnyei a nagy felbontás, a pontosság és a sokféle anyag.

A 3D csokoládényomtatásban használt fő technológiák összehasonlítását alapelvek, anyag, feldolgozási paraméterek, előnyök, hátrányok és gép típusok szerint az 1. táblázat tartalmazza.

Technológia	Extrúziós nyomtatás	3D nyomtatás kötéssel	Tintasugaras/Inkjet technológiás
Alapelv	Extrúzió és lehelyezés	Porkötés és drop-on-demand kötőanyag lerakás	Drop-on-demand lerakás és folyamatos sugárnyomtatás
Anyag	Szilárd alapú, paszta anyag	Folyadék alapú, por alapú	Folyékony alapú. alacsony viszkozitású anyag
Feldolgozási paraméterek	<ul style="list-style-type: none"> • Nyomtatófej magassága • Fúvóka átmérője • Nyomtatási sebesség • A fúvóka mozgási sebessége 	<ul style="list-style-type: none"> • Nyomtatófej típusok • Nyomtatási sebesség • Fúvóka átmérője • Rétegvastagság 	<ul style="list-style-type: none"> • Hőmérséklet a nyomtatófejben • Nyomtatási sebesség • Fúvóka átmérője • Nyomtatófej magassága
Előnyei	<ul style="list-style-type: none"> • A belépő szintű gépek alacsony költsége • Sokféle nyersanyag áll rendelkezésre • Könnyen testreszabható 	<ul style="list-style-type: none"> • Nagy számú potenciális anyag • Nagyon nagy gyártási sebesség • A tartószerkezetek automatikusan bekerülnek a réteggégyártásba • Alacsony képzési fajlagos energia • Komplex 3D-s élelmiszerégyártás 	<ul style="list-style-type: none"> • Nincs pazarlás a modellanyagból • Nagy felbontás és pontosság • Többféle anyag és többféle szín • Gyors gyártás

Hátrányai	<ul style="list-style-type: none"> • Kevésbé pontos és hosszú a felépítési idő • Nem lehet éles külső sarkokat kialakítani • A nyomtatott alkatrész anizotróp jellege • Nehéz megtartani a 3D struktúrákat az utófeldolgozás során 	<ul style="list-style-type: none"> • Érdes vagy szemcsés megjelenés • Utófeldolgozás szükséges a nedvesség eltávolításához vagy a szilárdság javításához • Korlátozott anyagmennyiség • Kevésbé tápláló termékek 	<ul style="list-style-type: none"> • Az utófeldolgozás károsíthatja a vékony és apró elemeket • Támasz anyagokat nem lehet újrahaznosítani, így nagyobb a pazarlás
Alkalmazása	Csokoládé, édességek, cukorból készült dekorációk, cukorkák	Csokoládé, pizza (por alapú)	Csokoládé, folyékony tészta, cukormáz, húspaszta, sajt, lekvárok, zselék
Gép típusa	Choc Creator, AIBOULLY Chocolate, Createbot 3D Food	Chefjet, Fujifilm Dimatix	Foodjet, Filament six- head 3D

1. táblázat: 3D nyomtatási technológiával nyomtatott élelmiszerek nyomtathatósági listája/ List of printability 3D printing technology applied for food design (Pitayachaval et al., 2018 nyomán)

4.3 A csokoládé 3D nyomtatási technológia folyamatoptimalizálása

Az első 3D csokoládénymotatót 2013-ban mutatták be, az Exeteri Egyetem által a 3D nyomtatási technológia alapjára és a kísérleti nyomtatási paraméterek ellenőrzésével. A második generációs Choc Creator gépet 2014-ben fejlesztették ki. 2015-ben készült el a teljesebb hardvert és szoftvert megalapozó Choc Creator 2.0 Plus. (Zhuo, 2015)

A csokoládé 3D nyomtatására folyékony csokoládét használnak tintaként, a nyomdafűvóka pedig hőszigeteléssel és hűtőrendszerrel rendelkezik, amely biztosítja, hogy a csokoládé egy meghatározott viszkozitással rendelkezzen, a csokoládé tapadásától függően, mivel rétegenként történik a lerakása. A fűvóka a gyártási folyamat során X-Y síkban és Z-irányban mozog az alkatrész interfész kontúrinformációinak megfelelően, majd hűtési kötéson megy keresztül, hogy megalkotja az interfész kontúrt. Amikor a formázási réteg befejeződött, a fűvóka a Z tengely mentén egy rétegvastagság magasságba emelkedik, majd kialakítja a következő réteget, és az új felületet az előző réteghez hegeszti, amíg a teljes objektum előállítására be nem fejeződik.

A szeletelő modul a szoftveres vezérlőrendszer központja. A szeletben generált dokumentumok közvetlenül befolyásolják a feldolgozási modell léptékét, pontosságát és összetettségét, ezáltal befolyásolják a feldolgozás és a formázás hatékonyságát.

A jelenlegi csokoládé 3D nyomtatási rendszer többnyire rögzített szeletrétegvastagságon és rögzített pásztázási sebességen alapul, a csokoládé tulajdonságaihoz illeszkedően.

4.3.1. Adaptív extrudálási rétegvastagság-optimalizálás a területváltozási sebesség alapján

A csokoládében a 3D nyomtatás meglévő szeletmódja egy fix rétegvastagságú szelet, melynél a fix rétegvastagságú szakasz felületén könnyen megjelenik a lépéshatás, túl nagy görbület esetén pedig a csokoládéhalom összeomlása következik be.

A 3D csokoládégyártás sikerét közvetlenül befolyásolja az, hogy mennyire gyors prototípuskészítés és formázás minősége. Ennek eredményeként egy javasolt optimalizálási megközelítés készült, amely a területváltozási sebességen alapuló adaptív szeletextrudálási vastagságot és a terület változási sebességén alapuló adaptív pásztázási sebesség szabályozást alkalmazza. A rétegvastagság adatfájl segítségével a modell szeletelésére a 2D sokszög kontúr minden egyes rétege megkapható a kontúrterület változási sebességének kiszámításával, hogy megkapjuk az egyes rétegek megfelelő rétegvastagságát és megfelelő extrudálási rétegvastagságot. Végül a terület változási sebessége felhasználható az egyes profilok optimális rétegleolvasási sebességének kiszámításához.

A nyomtatott csokoládékon végzett tesztek eredményei azt mutatták, hogy a nyomtatási beállítások optimalizálása bizonyos mértékig csökkentheti a nyomtatási időt és javíthatja a csokoládényomtatás minőségét.

4.4 3D csokoládényomtatás lehetséges üzleti modellejinek vizsgálata

4.4.1. Élelmiszer-ellátási lánc üzleti modellje

Az élelmiszer-ellátási lánc műveletei magukban foglalják a gazdálkodást, az élelmiszer-feldolgozást, az elosztást, a kiskereskedelmet és a fogyasztókezelést. Ezen műveletek között az élelmiszerbiztonsággal kapcsolatos aggályok miatt a tárolás, csomagolás és szállítás különös figyelmet igényel. Mivel ezen termékek gyártása hosszadalmas folyamat, az élelmiszer tárolása növeli a logisztikai költségeket. A csokoládé élelmiszer-ellátási lánc költségei magasabbak, mivel a csokoládé gyártási folyamata szigorú hőmérséklet-szabályozási követelményeket tartalmaz.

Az élelmiszer-feldolgozás felgyorsítása, a logisztikai és raktározási költségek csökkentése, valamint a termékek fogyasztási értékének növelése a hagyományos élelmiszer-ellátási lánc három kulcskérdése. Az ellátási lánc és a logisztikai menedzsment jelenlegi problémája, hogy felülvizsgálják stratégiájukat és technikáikat, hogy az élelmiszer-ellátási lánc fenntarthatóbbá váljon. A hagyományos élelmiszer-ellátási lánc és gyártósorok jobban megfelelnek a hagyományos termékek vagy minimális szintű egyénre szabott termékek tömeggyártásának. Ezzel szemben a személyre szabott termékek általában kézi megmunkálást, szakértelmet igényelnek, ami jelentős munkaerőköltséggel járhat.

Azáltal, hogy minden fogyasztót potenciális piaci szegmensként ismerünk fel, személyre szabott termékeket hozunk létre, állítunk elő, és minden egyes vásárlóhoz gyorsan eljuttatjuk. A fogyasztók egyre nagyobb hányada igényelheti a személyre szabott táplálkozást, és lennének hajlandóak többet költeni magasabb minőségű élelmiszerekre.

Ha a gyártók úgy döntenek, hogy termékeiket a vásárlók egyedi igényeikhez igazítják, akkor az fogyasztói elégedettséget eredményez. Viszont a vállalat teljes termelési költségei (ami a logisztikát és a termelést is magában tartalmazza) is lineárisan emelkednének, ahogy egyre több termék kerülne a piacra. Ezenkívül a gyártó cégek nehezen tudják diverzifikálni termékkínálatukat a piaci rivalizálás miatt, így kevésbé rugalmasak ahhoz, hogy

alkalmazkodjanak a fogyasztói igényekhez, akár a terméktervezés, színek, méretek és csomagolás tekintetében. Ennek eredményeként egyre népszerűbb lehet a hagyományos termékek piaci személyre szabásának folyamatos fejlesztése.

4.4.2. Hagományos csokoládégyártási és -gazdálkodási modell

A hagyományos csokoládékészítés rendkívül összetett eljárás, ami speciális gépekkel végezhető. A gyártási módszerek magukban foglalhatják a fröccsöntést, a merítést és a hengerlést stb. Ezenkívül a különféle öntvények különféle csokoládégyártó gépeket és gyártósorokat igényelnek. A piaci részesedés túlnyomó részét a hagyományos csokoládégyártási módszerek adják, amelyek elsősorban a standard termékekre és a nagyüzemi gyártásra koncentrálnak, viszont ezek nem tudják kielégíteni a vásárlók egyénre szabott csokoládé iránti igényét. Bár hagyományos módszerekkel is elő lehet állítani hasonló termékeket, ezek az eljárások költségesek és időigényesek, mivel jellemzően egyedi, különleges formák létrehozását teszik szükségessé.

4.4.3. Gyártó által vezetett és kereskedő által vezetett csokoládégyártási modell

Azt az üzleti modellt, amelyet a gyártók gyáraikban alkalmaznak a 3D nyomtatás megvalósítására, a gyártó által vezetett gyártási modellnek nevezik. A termékeket ezután a gyártók kiskereskedőkön és e-kereskedelmi platformokon keresztül értékesítik. Azt az üzleti stratégiát, amelyhez a kiskereskedők a technológiát felhasználják, kiskereskedő-vezérelt termelési modellnek nevezik. A 3D nyomtatott termékeket kiskereskedők üzleteiken és online piactereiken keresztül történik.

A gyártó profitja a hagyományos és a gyártó domináns modellek között helyezkedik el. A kiskereskedő több megrendelést ad a gyártónak félkész termékekre a hagyományos modellhez képest, majd saját személyre szabott termékéhez 3D nyomtatási technológiával hozza létre a készterméket.

Az egyedi termékeket a kiskereskedő állítja elő abban az ellátási láncban, amelyben a kiskereskedő dominál. A kiskereskedő készletmintája a szabványos termékekre vonatkozóan változatlan marad a modellben. A kereskedőnek leltárt kell készítenie a félkész árukról, hogy lehetővé tegye a 3D nyomtatás segítségével egyedi csokoládék igény szerinti

gyártását. A félkész termékek készleteinek bevezetése miatt a kiskereskedők teljes készletköltsége magasabb lesz a gyártók modelljeihez képest, mivel fizetniük kell a félkész termékek rendeléséért is, és az ilyen termékeknél felmerülő hiányköltségeikért és a termékek készlettartási költségeikért. Ez egyidejűleg alakítási folyamatköltséget generál, de a kiskereskedő egyedi árukészlete virtuális készletnek is tekinthető.

A kiskereskedők nyeresége a standard termékek és a testreszabott termékek értékesítéséből származó nyereség összege.

4.5. A csokoládé 3D nyomtatás alkalmazás technológiájának kiterjesztése

4.5.1 A csokoládé gyógyászati értéke

A modern tanulmányok igazolták a csokoládé jótékony egészségügyi hatásait, amelyeket generációk óta gyógyszerként ismertek el. A csokoládé antioxidánsokat tartalmaznak, amelyekről ismert, hogy megvédik a szervezetet a sejteket károsító szabad gyököknek nevezett káros molekuláktól. A csokoládé katechint tartalmaz, amelyek flavonoidként ismert antioxidánsok családjába tartoznak, amely az egyik legerősebb antioxidáns. Az étcsokoládéban 53,5 milligramm van 100 grammonként, ami négyszer több, mint a teában. A gyógyszeripari szektor a világ második legnagyobb iparágaként megelőzheti az olajipart, mivel az egészség a huszonegyedik századi ember legfőbb prioritása. A gyógyszeripari cikkek egy része a hagyományos kínai orvoslásból származik, és felhasználásukkal az emberi test egészségét hivatottak helyreállítani.

Manapság az emberek egyre inkább hajlandók pénzt költeni az egészségük megőrzésére, annak helyreállítására, ez egyre inkább kezd társadalmi divattá válni. A fogyasztói piac is folyamatosan növekszik. A piacon azonban a legtöbb termék tabletták és kapszulák formájában kerül forgalomba, amelyek gyakran a fogyasztó követelményinek kevésbé felel meg.

A Pennsylvaniai Állami Egyetem professzora által végzett tanulmány szerint 42 egészséges férfi naponta 46 g tejszokoládét kapott. A kísérlet alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a csokoládé 27 nap után nem befolyásolta a vér összkoleszterin- és alacsony sűrűségű lipoprotein-koleszterin szintjét, de a nagy sűrűségű lipoprotein koleszterinszintje, amely jótékony hatással van a szív- és érrendszerre, erősen megemelkedett. Ennek eredményeként

nem kell aggódni a csokoládéfogyasztás által okozott vér összkoleszterinszintjének emelkedése miatt. Ezenkívül a csokoládében lévő proantocianidinek (PAC) immunmoduláló tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek csökkentik egyes rosszindulatú daganatok és szív- és érrendszeri betegségek kockázatát azáltal, hogy hatékonyan megakadályozzák a mérgező peroxinitrit vegyület képződését. (Hao et al., 2019)

4.5.2. A csokoládé, mint funkcionális élelmiszer

A csokoládét, mint funkcionális élelmiszert annak érdekében fejlesztették ki, hogy fokozza a fogyasztók pszichológiai megfelelését az egészségügyi termékekkel szemben, és hogyan alakítsák át a hagyományos táplálékiegészítő termékek formáit, amik gyakran pirulák vagy kapszulák. Ennek az átalakulásnak az előnye, hogy a termék vonzóbbá válik, az élelmiszer étvágygerjesztőbb formában jelenik meg, emiatt a fogyasztó viszonyulása a termékhez pszichológiai értelemben javul. Másik nagy előnye, hogy gyártása személyre szabható, különféle színek, formák és betűtípusok nyomtathatók 3D csokoládénymtatással, így szemet gyönyörködtető vizuális effektusok hozhatók létre.

4.5.2.1. Csokoládé hozzáadott C-vitamin tartalommal

A vitaminok szorosan kapcsolódnak az emberi egészség megőrzéséhez. A napi ajánlott beviteli referencia érték (RDA) a felnőttek számára átlagosan kevesebb, mint 20 mg/nap a legtöbb vitamin esetében, míg a C-vitamin ajánlott napi beviteli értéke 100 mg/nap, így az egyik legmagasabban ajánlott napi vitamin-kiegészítő. A C-vitamin számos fontos szerepet játszik a szervezet normál működésének megőrzésében.

A C-vitamin számos élettani folyamatban szerepet játszik. Segíti a szervezet immunrendszerének jobb működését, megelőzi és kezeli a vérszegénységet, serkenti a kollagéntermelést és a szteroid anyagcserét, fenntartja a csontok és fogak normális működését, megőrzi a sejtmembránok épségét, méregtelenítő, öregedésgátló és rákellenes tulajdonságokkal rendelkezik. Sok zöldség és étel C-vitaminjának 40-80%-át veszíti el a rutin főzés során, ezért kortól és nemtől függetlenül fontos a C-vitamint étrendkiegészítésként fogyasztani. A csokoládéhoz megfelelő mennyiségű C-vitamin hozzáadásával a fogyasztók élvezhetik a csokoládét, eközben pedig a szükséges

vitaminpótlás is megtörténik. A szervezet által ajánlott napi C-vitamin-fogyasztás 60 mg, míg a terhes vagy szoptató nőknek napi 70-95 mg-ra van szükségük.

A kísérlet során 50 g csokoládét és 200 mg C-vitamin port olvasztottak fel és keverték össze 40°C-on. A lehető legstabilabb kristályok létrehozása érdekében a csokoládé felolvadása után még egy kis adag csokoládét adtak hozzá. A keveréket 32 °C-on tartották a 3D nyomtatásig, a kísérletet 22°C-on végezték. A csokoládé nyomtatásának optimalizálására a kísérletben adaptív rétegvastagságot és adaptív sebességet alkalmaztak. Az eredmények azt mutatták, hogy a C-vitamin hozzáadása nem befolyásolta a csokoládé színét, nem befolyásolta a csokoládé szemcseképző képességét. Ezenkívül a csokoládé nem kapott nemkívánatos állagot vagy ízt a C-vitamin por hozzáadásával.

4.5.2.2. Lutein hozzáadása

Az egyik karotinoid pigment, a lutein széles körben elterjedt a leveles zöldségekben, az emberi vérplazmában és a szemben. Az érlemeszesedés, az oxidáció és a rák elleni hatása mellett egyértelmű megelőző hatása van a retina degenerációja által okozott látásvesztés és vakság ellen.

A vizsgálatok kimutatták, hogy a lutein jelentősen elnyeli a kék fényt, amely közel áll az UV-sugárzáshoz. A retinát elérő látható fény legerősebb és potenciálisan veszélyes formája a kék fény, különösen a látható kék fény spektruma és a közeli UV fény. Az az idő, amelyre a fénynek szüksége van a retina legmagasabb luteinkoncentrációjú régiójában, mielőtt elérné a retinára érzékeny rúd- és kúpsejteket, csökkenthető, ha a makulában magas a luteinkoncentráció. A gyermekek az egyik elsődleges populáció, akik szemüket használják és védik. A rövidlátás és más szemproblémák a fiataloknál jóval gyakoribbak, mint az előző generációknál. A pszichológiai és fizikai védelem érdekében luteint adható a csokoládéhoz, amely a gyerekek körében népszerű édesség. Ez megkönnyítheti a gyermekek számára fontos lutein bevitelét. Az emberi szervezet napi 12 mg luteint javasol étrend-kiegészítőként. A csokoládényomtatási kísérletben 50 g csokoládét kombináltunk 40 mg orális lutein-észter mikrokapszulával. A körömvirág, amelyből lutein-észter mikrokapszula port vonják ki, egy természetes zöld növényi kivonat, amelyet koncentrált formában gyártják.

A kísérlet során 50 g csokoládét és 40 mg luteint olvasztottak fel és keverték össze 40°C-on. A csokoládé felolvadása után kis mennyiségű csokoládét adtak hozzá, hogy a kristályosodás gyorsan végbemenjen. A kísérletet szobahőmérsékleten 22 °C-on végezték. A 3D

nyomtatáshoz a csokoládét 32 °C-on tartották. A modellben 15 gramm csokoládét és 12 mg luteint használtak fel. Minden csokoládé tartalmazza a szervezetnek szükséges napi lutein mennyiséget. A csokoládé nyomtatásának optimalizálása érdekében a kísérleti nyomtatásban adaptív rétegvastagságot és adaptív sebességet alkalmaztak. A lutein-kiegészítés alig befolyásolja a színeltolódást. A por a csokoládéban szemcsés felhalmozódást nem okozott a nyomtatási folyamat során, folyóssága jó volt és a csokoládé nyomtathatósági képessége is megfelelő volt. Ezenkívül a luteinpor nem volt negatív hatással a csokoládé ízére vagy állagára.

4.5.2.3. Metil-cellulóz hozzáadása

A fehér színű metil-cellulózt természetes cellulózból állítják elő, íze semleges. Gyakran használják pékáruk, sült ételek, édességek, cukorkák és levesek kulináris összetevőjeként, és számos felhasználási területe van, használják filmképzőként, befolyásolja az emulgeálhatóságot, a ragasztóképességet és a sűrítőképességet. A 3D nyomtatási kísérlet elvégzéséhez kis mennyiségű metil-cellulózt adtunk a csokoládéhoz. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) nem határozza meg a metil-cellulóz napi ajánlott bevitelét, mivel fogyasztását élelmiszerekbe keverve biztonságosnak ítélték meg. 2 és 8 tömegszázalék metil-cellulózt adtak a csokoládéhoz, hogy megnézzék, hogyan befolyásolja a formázást és a nyomtatást. A vizsgálatok kimutatták, hogy 2, illetve 8 tömegszázalék metil-cellulóz hozzáadása bizonyos mértékben javíthatja a csokoládényomtatást. A csokoládényomatok minőségének javulása azonban nem lineárisan korrelál a metil-cellulóztartalom növekedésével. A csokoládé zsírtartalmának aránya jelentősen csökken, ha a hozzáadott metil-cellulóz mennyisége elér egy adott tartományt. Ezenkívül a metil-cellulóz adhéziós teljesítménye minimális lesz, ami csökkenti a csokoládé formázási képességét. A laboratóriumi kísérleti tapasztalat alapján szerény mennyiségű (kb. 1%-nál kevesebb) adalékanyag hozzáadása csekély hatással lesz a csokoládé nyomtatására és formázására. Ekkora mennyiségű metil-cellulózt lehet hozzáadni, hogy csökkentse az esetleges további adalékanyagok hatását, és javítsa a csokoládé formázását és nyomtatását.

4.5.3. Mikrokapszulázás

Az élelmiszerek tápanyagtartalma különböző komponensek hozzáadásával növelhető, de az íz, az állag, a szín és az aroma károsodhat. Ezenkívül az anyagok természetes lassú bomlása, az oxidáció, valamint az anyagok és más élelmiszer-elemek közötti kölcsönhatások csökkenthetik a tápanyagok biológiai hozzáférhetőségét. Az aktív komponensek környezettől való védelme érdekében a mikrokapszulázás ásványi anyagokat, vitaminokat, aromákat és illóolajokat tárolhat egy másik anyagban. Az elektrohidrodinamikus porlasztást, az egyik mikrokapszulázási technikát beépítették egy olyan bionyomtató tervezésébe, amely kettős falú mikrogömböket állít elő bioaktív gyógyszeradagoló rendszerhez. Több nyomtatófejes rendszer alkalmazásával, ahol legalább egy nyomtatófej mikrokapszulákat hoz létre és adagol a gyártott élelmiszerekbe, lehetőség nyílik ennek a technológiának az élelmiszerek nyomtatásába történő integrálására. Ez a módszer leegyszerűsítheti az a jelenlegi funkcionális élelmiszer-gyártási folyamatot, fokozza a funkcionális összetevők stabilitását (pl. probiotikumok és bioaktív összetevők), és szabályozza az aromák és tápanyagok felszabadulását. Marcial-Coba és munkatársai (2018) kísérletei során oxigénre érzékeny probiotikum (*A. muciniphila*) kapszulációját étcsokoládéba helyezve végezte el, eredményeik alapján arra jutottak, hogy a mikroenkapszulált baktériumok jobb túlélést mutattak a csupasz sejtekkel szemben.

5. Összefoglalás

Dolgozatom elkészítésének célja az volt, hogy feltérképezsem, milyen technológiai lehetőségek vannak a csokoládé 3D nyomtatására, és ezeket egymáshoz vessem, valamint a 3D csokoládényomtatásban rejlő fejlesztési lehetőségeket összegyűjtsem, célzott használhatóságára vonatkozóan különböző táplálkozási igényeknek megfelelően. A 3D nyomtatási technológia az élelmiszeriparban újdonságnak számít, melynek segítségével háromdimenziós tárgyak előállítása lehetséges a kívánt szerkezet és forma szerint, egyéni igényeknek megfelelően. A technológia lényege, hogy extrúziós művelettel, majd rétegek egymásra helyezésével építi fel a tervezett objektumot. Ez a folyamat rendkívül összetett az élelmiszeripari alkalmazásban, mert különböző fizikai és termodinamikai jelenségek játszódnak le egyidejűleg.

A csokoládétermékek nagyrésze jelenleg hagyományos technikákkal készül, de az eddigi kutatások szerint a 3D csokoládé extrudátumok remek átmeneti rugalmassággal és alaktartó tulajdonságokkal rendelkeznek, amellyel olyan formák hozhatók létre, amelyek a hagyományos csokoládégyártási technikákkal nem lehetségesek.

Hátránya ennek a technológiának a gyártási idő hosszúsága, ami számos paraméter függvénye. Egyelőre a hagyományos gyártás leváltására a 3D nyomtatás időbeni korlátok miatt nem alkalmas, de összetett objektumok létrehozása piaci rés lehet, és a technológia gyors fejlődésével a 3D élelmiszernyomatok elkészítési ideje is csökkenni fog.

Az élelmiszernyomtatásban egyik legsikeresebben nyomtatható élelmiszer jelenleg a csokoládék, mivel a csokoládémassza természetéből adódóan alkalmas erre, különböző technológiákkal megvalósítható, mint az extrúziós, kötőanyag-lehelyezéssel és tintasugaras nyomtatás. Ezek az alkalmazások még korai stádiumban vannak, egyszerű grafikával és korlátozott belső struktúrákkal. Mindeközben a gyártási folyamat számszerűsítése szükséges, hogy következetes gyártási eredményeket lehessen elérni, az élelmiszertervezési folyamatot úgy kell felépíteni, hogy ösztönözze a felhasználói innovációt, és létre kell hozni egy szimulációs modellt, amely a tervezést és a gyártást a tápanyagszabályozással kombinálja.

A csokoládé 3D gyártásával a hagyományos üzleti modell felborulását is hozhatja magával, így a technológia beépítésének kérdése mindenképp fontos lehet a nagy csokoládégyártó cégek számára is.

Az élelmiszerek tápanyagtartalma különböző komponensek hozzáadásával növelhető, de a hozzáadott anyag és a csokoládé minőségét is befolyásolhatja, ezért erre a megoldás a mikrokapszulázás lehet, ami kifejezetten ajánlott, ha a terméket hosszabb ideig tárolják.

A 3D nyomtatás az élelmiszeriparban azon belül a csokoládéiparban is pozitív fejlődést hozott, lehetővé tette a gyors, összetett 3D struktúrák létrehozását.

Borsi Noémi Szakdolgozat

6. Irodalomjegyzék

Afoakwa, E.O. (2010): *Chocolate Science and Technology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, ISBN:9781405199063

Afoakwa, O., Paterson, A., Fowler, M. (2007) Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate – a review. *Trends in Food Science & Technology*. 18 (6) 290-298.

Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., Ryan, A. (2008) Flavor formation and character in cocoa and chocolate: a critical review. *Critical Review in Food Science and Nutrition*. 48 (9):840-857. DOI:<https://doi.org/10.1080/10408390701719272>

Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., Vieira, J. (2007): Characterization of melting properties in dark chocolates from varying particle size distribution and composition using differential scanning calorimetry. *Food Research International*. 41 (7):751-757. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.05.009>

Attaie, H., Breitschuh, B., Braun, P., Windhab, E. (2003): The functionality of milk powder and its relationship to chocolate mass processing, in particular the effect of milk powder manufacturing and composition on the physical properties of chocolate masses. *International Journal of Food Science and Technology*. 38 (2003) 325–335. DOI:10.1046/j.1365-2621.2003.00678.x

Beckett, S.T. (2019): *The Science of Chocolate*. Formerly Nestle Product Technology Centre, York, UK ISBN: 978-1-78801-235-5

Beckett, S.T.; Craig, M.A.; Gurney, R.J.; Ingleby, B.S.; et al. (1994). Cold extrusion of chocolate. *Food and bioproducts processing : transactions of the Institution of Chemical Engineers*. C1: 72. ISSN : 0960-3085

Biczó-Kabai, V.(2011): Kakaóvaj-egyenértékű növényi zsírok és a tárolási körülmények hatása csokoládé modellrendszerek reológiai és érzékszervi jellemzőire.

Élelmiszertudományi Doktori Egyetem, doktori értekezés

Bolenz, S., Felbrich, A., Kutschke, E. (2008): Fettärmere Schokolade mithilfe von Wasser. *Süßwaren Technik und Wirtschaft*. 53 (9): 10-13.

Buscato, M. H. M., Hara, L. M., Bonomi, E. C., Calligaris, G. A., Cardoso, L. P., Grimaldi, R., Kieckbusch, T. G. (2018). Delaying fat bloom formation in dark chocolate by adding sorbitan monostearate or cocoa butter stearin. *Food Chemistry*. 256, 390–396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.127>

Causser, C., Butcher, S., Henderson, J., Iggulden, G. (2009). They've got a golden ticket. *IEEE Potentials*, 28(4), 42–44. DOI:<https://doi.org/10.1109/MPOT.2009.933608>

Chen, J., Ghazani, S. M., Stobbs, J. A., & Marangoni, A. G. (2021). Tempering of cocoa butter and chocolate using minor lipidic components. *Nature Communications*. 12(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25206-1>

Chen, Y.W., Mackley, M.R. (2006): Flexible chocolate. *Soft Matter*. 4(2): 304-309. DOI: <https://doi.org/10.1039/B518021J>

Cohen, D. L., Lipton, J. I., Cutler, M., Coulter, D. Vesco, A., Lipson, H. (2009): Hydrocolloid printing: a novel platform for customized food production. Paper presented at the Proceedings of solid freeform fabrication symposium (SFF'09).

Engmann, J., Mackley, M.R., (2006). Semi-solid processing of chocolate and cocoa butter: modelling rheology and microstructure changes during extrusion. *Food and Bioproducts Processing*. 84 (2), 102-108. DOI: <https://doi.org/10.1205/fbp.05103>

Faqih, A.M.N., Mehrotra, A., Hammond, S.V., Muzzio, F. J. (2007): Effect of moisture and magnesium stearate concentration on flow properties of cohesive granular materials. *International Journal of Pharmaceutics*. 336 (2):338-345. DOI:10.1016/j.ijpharm.2006.12.024

Gasztanyi, K., Bogdán, J. (1985): Élelmiszerek kolloidikája és reológiája. Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem, jegyzet

Hamilton, C. A., Alici, G., Panhuis, M. (2018): 3D printing vegemite and marmite: redefining “breadboards.”. *Journal of Food Engineering*. 220, 83–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.01.008>

Hao, L., Li, Y., Gong, P., Xiong, W. (2019): Material, Process and Business Development for 3D Chocolate Printing. Chapter 8. In: Godoi, F.C., Bhandari, B.R., Prakash, S., Zhang, M. (szerk.): *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Academic Press, London, UK, pp. 207-254 ISBN:978-0-12-814564-7

Karyappa, R., Hashimoto, M. (2019): Chocolate- based Ink Three-dimensional Printing (Ci3DP). *Scientific Reports*. 9:14178 DOI:10.1038/s41598-019-50583-5

Kikuta, J., Kitamori, N. (1994): Effect of mixing time on the lubricating properties of magnesium stearate and the final characteristics of the compressed tablets. *Drug Development and Industrial Pharmacy*. 20 (3): 343-355. DOI:10.3109/03639049409050187

Kleinert, J. (1997): *Handbuch der Kakaoverarbeitung und Schokoladenherstellung*. Behr's Verlag GmbH & Co., Hamburg

Lanaro, M., Forrestal, D.P., Scheurer, S., Slinger, D.J., Liao, S., Powell, S.K., Woodruff, M.A. (2017): 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*. 215: 13-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029>

Lanaro, M., Mathilde, M.R., Woodruff, M.A. (2019): 3D Printing Chocolate: Properties of Formulations for Extrusion, Sintering, Binding and Ink Jetting. Chapter 6. In: Godoi, F.C., Bhandari, B.R., Prakash, S., Zhang, M. (szerk.): *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Academic Press, London, UK, pp. 151-171 ISBN:978-0-12-814564-

Langevelde, A.V., Malssen, K.V., Peschar, R., Schenk H. (1999): Phase behavior and extended phase scheme of static cocoa butter investigated with real-time X-ray powder diffractio. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 76:669-776.

Löser, U., Tscheuschner, H.D. (1981): Untersuchungen zum Temperierprozeß von Schokoladenmassen. *Lebensmittelindustrie* 28 (8) 370-374.

MAGYAR ÉLELMISZERKÖNYV 1-3-2000/36 számú előírás (2010): Az emberi fogyasztásra szánt kakaó- és csokoládétermékekről.
https://elelmiszerlanc.kormany.hu/download/9/2b/a2000/1-3-2000_36.pdf (Megtekintési dátum: 2023.03.31.)

Mantell, D.,A., Hays,A., W., Langford, Z., C. (2015) Printing 3D tempered chocolate.
Google Patents: US9185923B2

Mantihal, S., Prakash, S., Condi, F., Bhandari, G.B. (2017): Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 44:21-29.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.012>

Mantihal, S., Prakash, S., Bhandari, G.B. (2019): Textural modification of 3D printed dark chocolate by varying internal infill structure. *Food research International*. 121:648-657.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.034>

Mantihal, S., Prakash, S., Condi, F., Bhandari, G.B.(2019): Effect of additives on thermal, rheological and tribological properties of 3D printed dark chocolate. *Food Research International*. 119:161-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.056>

Marcial-Coba, M.S., Saaby, L., Knøchel, S., Nielsen, D.S. (2019): Dark chocolate as a stable carrier of microencapsulated *Akkermansia muciniphila* and *Lactobacillus casei*, *Microbiology letters* 2:366 DOI: <https://doi.org/10.1093/femsle/fny290>

Masen, M., Cann, P., Friction Measurements with Molten Chocolate. *Tribology Letters*, 66 (1): 24. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0958-x>

Matissek, R. (2000) Pflanzenfette in Schokolade - Rechtliche und analytische Aspekte. *Lebensmittelchemie* 54: 25-30

Pitayachavall, P., Sanklong1, N., Thongrak, A. (2018): A Review of 3D Food Printing Technology. *MATEC Web of Conferences* 213:01012 DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821301012>

Podchongac, P., Aumpaib, K., Sonwaib, S., Rousseauc, D. (2022): Rice bran wax effects on cocoa butter crystallisation and tempering. *Food Chemistry*. 397: 133635 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133635>

Prawira, M., Barringer, S.A. (2009): Effects of conching time and ingredients on preference of milk chocolate. *Journal of Food Processing and Preservation*. 33(5):571–589. DOI: <https://doi.org/10.1111/J.1745-4549.2008.00272.X>

Rando P., Ramaioli, M. (2021): Effect of heat transfer on print stability of chocolate. *Journal of Food Engineering*. 294:110415 DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.110415

Russell, B.D., Ovaici, H., Lasenby, J., Beckett, S.T., Wilson, D.I., (2006) Real-time monitoring of chocolate extrusion by signal processing of pressure transducer data. *Food Control*. 17 (11), 862-867 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.06.003>.

Schantz, B., Linke, L. (2001): Der Einfluss von Emulgatoren auf Schokoladen. Messmethoden für Erstarrung und Kontraktion. *Zucker- und Süßwarenwirtschaft* 54 (12) 15-17.

Servais, C., Ranc, H., Roberts, I. (2003): Determination of chocolate viscosity. *Journal of Texture Studies*. 34 (5–6):467-497. DOI:<https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2003.tb01077.x>

Simoneau, C., Hannaert, P., Anklam, E. (1999): Detection and quantification of cocoa butter equivalents in chocolate model systems: analysis of triglyceride profiles by high resolution GC. *Food Chemistry*. 65 (1999) 111-116.

Storgaard, S. (2000): Neue pflanzliche Fette. *Süßwaren Technik und Wirtschaft*. 43 (7) 28-29.

Sun et al., (2015) An Overview of 3D Printing Technologies for Food Fabrication. *Food Bioprocess Technol*. 8:1605–1615 DOI 10.1007/s11947-015-1528-6

Takagishi, K., Suzuki, Y., Umezu, S., (2018). The high precision drawing method of chocolate utilizing electrostatic ink-jet printer. *Journal of Food Engineering*. 216, 138-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.017>

Thangalakshmi1, S., Vinkel, K. A., Prithviraj1, V. (2021): A Comprehensive Assessment of 3D Food Printing: Technological and Processing Aspects. *Journal of Biosystems Engineering*. 46:286–304.

Wille, R.L., Lutton, E.S., (1966). Polymorphism of cocoa butter. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 43 (8), 491-496 DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02641273>.

Zhuo, P., (2015): 3D Food Printer: Development of Desktop 3D Printing System for Food Processing. ETD, Master's thesis

Internet 1. Global chocolate, cocoa beans, lecithin sugar and vanilla market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/global-chocolate-market-164.html> (Megtekintési dátum: 2022.11.01.)

Internet 2: Oskay, W., Edman, L., (2009) CandyFab. <https://candyfab.org/> (Megtekintési dátum: 2022.12.21.)

NYILATKOZAT

a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió¹ nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: BORSI NOEMI
A Hallgató Neptun kódja: YKGOH5
A dolgozat címe: A CSOKOLÁDE 3D NYOMTATÁSI TECHNIKÁJA TÍPUSAI, FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI
A megjelenés éve: 2023
A konzulens tanszék neve: GABONA ÉS IPARI NÖVÉNY TECHNIKAI TANSZÉK

Kijelentem, hogy az általam benyújtott záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió² egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, s az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a Záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdonkezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitóri rendszerébe.

Kelt: 2023 év APRILIS hó 30 nap

Borsi Noemi
Hallgató aláírása

¹ A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

² A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

KONZULTÁCIÓS NYILATKOZAT

A BORSI NOEMI (név) (hallgató Neptun azonosítója: YK60H5)
konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a
záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfólió¹ áttekintettem, a hallgatót az
irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól
tájékoztattam.

A záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót a záróvizsgán történő védeésre
javaslom / nem javaslom².

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*3}

Kelt: 2023 év 05 hó 02 nap


Belső konzulens

¹ A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

² A megfelelő aláhúzendő.

³ A megfelelő aláhúzendő.