

Proses Produksi, Sumber Material Protein dan Karakteristik Produk Daging Analog: Review

Widyastuti^{*1}, Muhammad Kusumawan Herliansyah², Herianto³

¹ Program Studi Teknik Industri, Universitas Muhammadiyah Gombong

²⁻³ Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

Email: widyastuti@unimugo.ac.id^{*1}, herliansyah@ugm.ac.id², herianto@ugm.ac.id³

Abstrak

Daging analog merupakan produk dari protein nabati yang tekstur, warna, rasa, serta kandungan nutrisinya menyerupai daging hewan. Salah satu tantangan utama dalam memproduksi daging analog adalah membentuk produk agar menyerupai tekstur dan kualitas sensoris. Strukturisasi daging analog pada dasarnya terdiri dari proses *top down* dan *bottom up*. Tiap jenis proses memiliki karakteristik masing-masing, sehingga untuk menentukan proses yang tepat perlu adanya tinjauan komprehensif yang dapat dijadikan sebagai acuan. Berdasarkan hal tersebut maka dilakukan telaah pustaka dengan metode *systematic literature review*. Penelusuran artikel dilakukan pada *data base SCOPUS* pada rentang waktu 2020-2024. Tujuan dari telaah pustaka ini adalah mengidentifikasi jenis proses produksi daging analog, material dan karakteristik produk pada tiap jenis proses. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa proses *top down* terdiri dari teknik *extrusion* dan *shearing*, sedangkan proses *bottom up* meliputi teknik *spinning* dan *3D printing*. Sumber protein nabati utama yang umum digunakan adalah *soy protein isolate*, *pea protein isolate*, dan *wheat gluten*. Sumber protein lain yang digunakan sebagai bahan tambahan adalah *mung bean protein isolate*, *rice protein isolate*, *zein*, dan *young jackfruit*. Bahan *hydrocolloid* (*xanthan*, *guar gum*, *carragenan*, *transglutaminase*, *methylcellulose*) digunakan untuk meningkatkan stabilitas serat dan bentuk daging analog. Karakteristik daging analog yang dihasilkan dengan proses *extrusion*, *shearing*, *spinning* memiliki fokus utama untuk mencapai standar kualitas serat, kekerasan dan *chewiness*. Proses *3D printing* dapat menghasilkan daging analog yang dapat menyerupai standar *hardness* dan *springiness* daging sapi.

Kata kunci: daging analog, *extrusión*, *shearing*, *spinning*, *3d printing*

Abstract

Analog meat is a product made from vegetable protein that texture, color, taste and nutritional content similar to animal meat. One of the main challenges in producing meat analogues is structuring product to resemble its texture and sensory qualities. Meat analog structuring process basically consists of *top down* and *bottom up*. Each process has its own characteristics, so to determine the appropriate process need comprehensive review that can be used as a reference. Therefore, a systematic literature review was conducted in this study. Article searches were carried out on the SCOPUS database in the 2020-2024 time period. The aim of this literature is to identify types of analog meat production processes, materials and product characteristics in each type of process. The identification results show that the *top down* process consists of *extrusion* and *shearing* techniques, while the *bottom up* process includes *spinning* and *3D printing* techniques. The main plant protein sources commonly used were *soy protein isolate*, *pea protein isolate*, and *wheat gluten*. Other protein sources used as additional ingredients were *green bean protein isolate*, *rice protein isolate*, *zein*, and *young jackfruit*. Hydrocolloid material (*xanthan*, *guar gum*, *carragenan*, *transglutaminase*, *methylcellulose*) were used to increase fiber stability and shape of meat analogues. The characteristics of analog meat produced by *extrusion*, *shearing*, *spinning* processes focused on standards of fiber textured quality, hardness and *chewiness*. The *3D printing* process can produce analog meat that resembles the hardness and *chewiness* of beef.

Keywords: meat analog, *extrusión*, *shearing*, *spinning*, *3d printing*

1. Pendahuluan

Daging merupakan salah satu sumber protein hewani yang banyak dikonsumsi. Pertumbuhan konsumsi daging sapi, unggas, kambing, babi secara global pada 2030 diperkirakan meningkat 14% dibandingkan rata-rata konsumsi daging pada 2018 – 2020 (OECD FAO, 2021). Seiring dengan meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap kesehatan dan isu lingkungan, daging berbasis protein nabati yang dikenal dengan *plant based meat* atau

daging analog nabati saat ini menjadi salah satu produk yang diminati oleh konsumen (Ismail et al., 2020). Permintaan pasar terhadap jenis daging ini diproyeksikan mencapai nilai 19,2 miliar dollar Amerika pada tahun 2028 dengan tingkat pertumbuhan 7,7% dalam rentang waktu 2023 – 2028 (Markets and markets, 2023).

Daging analog adalah tiruan daging dari protein nabati yang memiliki bentuk, tekstur, warna, rasa, serta kandungan nutrisi mirip dengan daging hewan

^{1*} Penulis korespondensi

(Ramachandraiah, 2021). Salah satu tantangan utama dalam proses produksinya adalah membentuk bahan-bahan daging analog berbasis protein nabati agar menyerupai tekstur dan kualitas sensoris (*mouthfeel, chewiness, cohesiveness, springiness, juiciness*) daging hewani (Ozturk & Hamaker, 2023).

Proses membentuk tekstur yang mirip dengan daging hewani dapat dilakukan dengan menggunakan teknik mekanis (*extrusion, shearing* dan *spinning*). Prinsip dasar proses *extrusion* dan *shearing* adalah membentuk serat dengan memberikan suhu dan tekanan yang tinggi sedangkan proses *spinning* adalah dengan proses pemintalan (Sha & Xiong, 2020a). Selain ketiga metode tersebut, teknologi terbaru yang saat ini berkembang adalah teknik *3D printing*. Struktur serat dibuat lapis demi lapis menggunakan *3D printer* sesuai desain bentuk geometri yang diinginkan konsumen (Wen et al., 2023).

Setiap teknik proses memiliki karakteristik masing-masing dan terus mengalami perbaikan seiring perkembangan teknologi. Namun demikian *review* mengenai daging analog pada lima tahun terakhir masih berfokus pada fungsi, keterbatasan dan peluang daging analog (Imran & Liyan, 2023), kandungan nutrisi (Eswaran et al., 2023), jenis protein yang digunakan (Zahari, Purhagen, et al., 2023a) (Ozturk & Hamaker, 2023), serta parameter proses strukturisasi daging analog (Du et al., 2023). Telaah tentang keterkaitan proses, jenis material dan karakteristik produk yang dihasilkan belum dibahas secara menyeluruh. Berdasarkan hal tersebut maka tujuan dari *review* ini adalah mengidentifikasi jenis proses produksi daging analog, mengidentifikasi material dan karakteristik produk pada tiap jenis proses. Tinjauan komprehensif ini diharapkan dapat menjadi inspirasi dalam inovasi pengembangan daging analog dimasa mendatang.

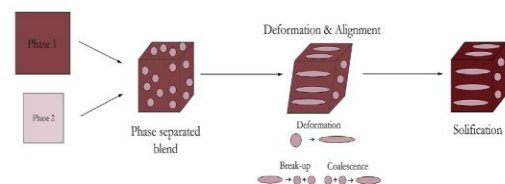
2. Metode

Review dilakukan menggunakan metode *systematic analysis* untuk menjawab tiga pertanyaan yaitu : (a) Proses apa yang yang digunakan dalam pembuatan daging analog?, (b) Material apa yang digunakan dalam proses tersebut?, (c) Bagaimana karakteristik daging analog yang dihasilkan?. Penelusuran artikel dilakukan pada *data base SCOPUS* berdasarkan kata kunci (TITLE-ABS-KEY ("meat analog") OR TITLE-ABS-KEY ("plant based meat") AND TITLE-ABS-KEY (extrusion) OR TITLE-ABS-KEY (spinning) OR TITLE-ABS-KEY (shearing) OR TITLE-ABS-KEY (printing)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2024)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")

)) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")). Publikasi dibatasi pada artikel berbahasa Inggris, yang diterbitkan dalam jurnal di bidang engineering antara tahun 2020-2024. Selanjutnya proses *screening* dilakukan berdasarkan kesesuaian judul dan abstrak dengan target analisis. Artikel yang memenuhi syarat sejumlah 31 buah, terbagi menjadi 5 artikel yang berisi penjelasan proses produksi daging analog serta 26 artikel mengenai penelitian proses produksi daging analog menggunakan teknik *extrusion, shearing, spinning* dan *3D printing*.

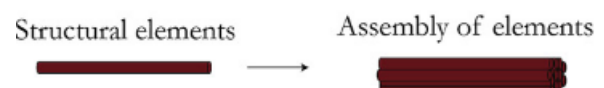
3. Hasil dan Pembahasan

Strategi pembuatan struktur daging analog pada dasarnya terdiri dari dua jenis yaitu *top down* dan *bottom up*. Prinsip kerja strategi *top down* adalah mengubah biopolimer protein nabati menjadi potongan yang menyerupai daging menggunakan suhu dan tekanan tinggi (Dekkers et al., 2018). Proses yang menggunakan strategi ini adalah *extrusion* dan *shearing*.



Gambar 1. Prinsip kerja *top down* (Dekkers et al., 2018)

Prinsip kerja strategi *bottom up* adalah pembentukan struktur daging yang dimulai dari pembentukan serat satu persatu dan menggabungkannya menjadi bentuk utuh potongan daging. Proses yang menggunakan teknik ini adalah *spinning* dan *3D printing* (Ozturk & Hamaker, 2023).



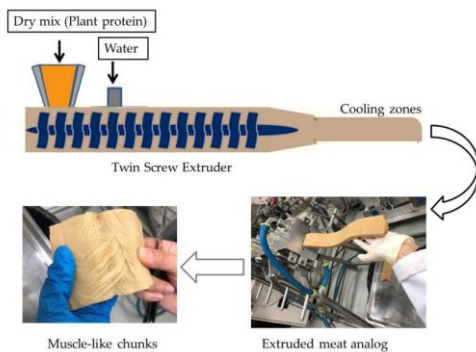
Gambar 2. Prinsip kerja *bottom up* (Dekkers et al., 2018)

Jenis protein, komposisi bahan dan struktur serat memiliki peran penting dalam membentuk karakteristik tekstur dan kualitas sensoris daging analog. Perbedaan teknik proses mempengaruhi karakteristik produk yang dihasilkan (Sha & Xiong, 2020b). Penjelasan mengenai prinsip dasar proses pembentukan dan karakteristik yang dihasilkan dijelaskan pada sub bab di bawah ini.

3.1. Extrusión

Extrusión merupakan teknologi yang paling umum menghasilkan daging analog. Proses ini terdiri dari tahap pencampuran, pemanasan pada suhu 100- 160 °C, *shear plasticizing* dan *molding*. Perlakuan mekanis jangka pendek pada suhu tinggi ini dapat membentuk protein nabati menjadi struktur yang berserat (Du et al., 2023). Namun karena proses tersebut berlangsung pada suhu dan tekanan tinggi maka dapat menyebabkan denaturasi protein dan hilangnya nutrisi (Ozturk &

Hamaker, 2023). Gambaran peralatan ekstrusi dijelaskan pada gambar 3 berikut ini :



Gambar 3. Prinsip dasar *hot extrusion* (Mazumder et al., 2023)

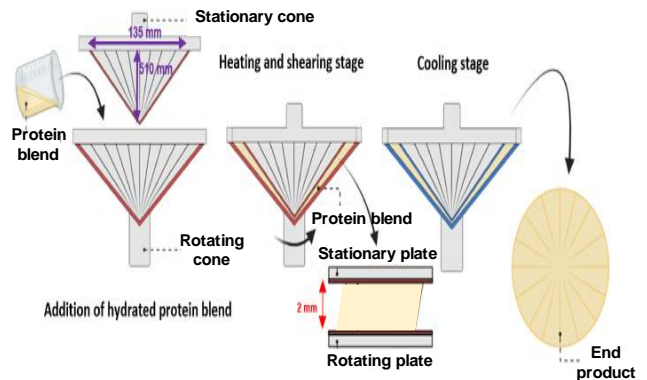
Pada proses ekstrusi *soy protein isolate* (SPI) dan *pea protein isolate* (PPI), daging analog yang dihasilkan memiliki struktur serat yang lebih kuat dan kenyal dibandingkan produk berbahan dasar *rice protein isolate* (RPI) (Mao et al., 2024). Kombinasi *hempseed protein concentrate* (HPC) dengan *wheat gluten* (WG) maupun *chickpea protein concentrate* (CPC) mempunyai tingkat kekerasan, *chewiness* dan *resilience* yang lebih tinggi dibandingkan daging analog yang hanya menggunakan WG (Zahari, Rinaldi, et al., 2023). Tekstur yang lebih lembut dan mudah dikunyah dapat dicapai dengan menambahkan *hydrolyzed wheat gluten* (HWG) pada campuran *soy protein concentrate* (SPC) dan WG (Zhang et al., 2023a). Pada penggunaan HPC penambahan *oat fibre residue* (OFR) tidak berpengaruh terhadap warna, struktur yang terbentuk dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban bahan (Zahari, Purhagen, et al., 2023a). Demikian pula pada penambahan *wheat bran* (WB) dalam kisaran 5 – 10% tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap struktur serat yang terbentuk dari ekstrusi PPI (Snel et al., 2023a).

Bahan lain yang dapat diproses menggunakan ekstrusi adalah *lupin protein concentrate* (LPC), *lupin protein isolate* (LPI) (Ramos-Diaz et al., 2023a), kombinasi PPI dan variasi *sunflower protein concentrate* (SPC) (Pöri, Lille, et al., 2023), paduan PPI maupun PPC dengan *oat bran* (OB) dan *wheat bran* (WB) (Rekola et al., 2023b). Selain itu *dry-fractionated mung bean protein concentrate* (DFMB) juga dapat dibentuk menjadi daging analog dengan kondisi operasi pada suhu 105 – 110°C (De Angelis et al., 2023a). Proses ekstrusi juga memungkinkan penggunaan bahan *re-work* sebagai material dasar. Daging analog yang dihasilkan dari *re-work* SPI maupun PPI memiliki kualitas visual dan tekstur yang tidak jauh berbeda dibandingkan dengan hasil dari *fresh* material kedua bahan (Snel et al., 2023b). (Rekola et al., 2023a). Gambaran visual daging analog yang dihasilkan dari proses ekstrusi menggunakan bahan-bahan tersebut disajikan dalam Tabel 1.

3.2. Shearing

High temperature and shear cell (HTSC) merupakan jenis proses *shearing* yang sering

digunakan. Teknik ini mirip dengan ekstrusi namun berlangsung dalam kondisi *batch*. Tahapan proses terdiri dari pencampuran, *thermo-mechanical* dan pendinginan. Area *shearing* berada diantara permukaan kerucut atas yang statis dan kerucut bawah berputar. Proses ini dapat menghasilkan daging dengan kondisi yang lebih lembut dan parameter operasi lebih mudah untuk dikendalikan (Taghian Dinani, van der Harst, et al., 2023) .



Gambar 4. Prinsip dasar proses *shearing* (Taghian Dinani, van der Harst, et al., 2023)

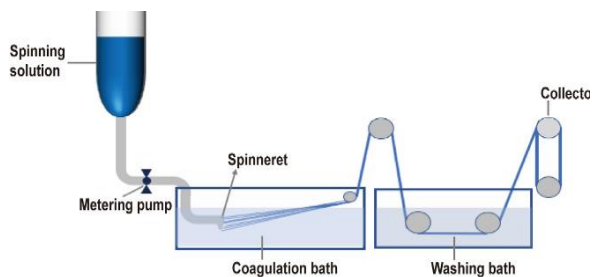
Daging analog yang dihasilkan dengan proses *shearing* antara lain paduan bahan PPI-WG dengan *L-cysteine* (CYS) dan *L-ascorbic acid* (AA). Pada penambahan 2000 ppm CYS serat yang terbentuk cukup besar dan jelas. Penambahan 2000 ppm AA yang terbentuk serat-serat kecil (Taghian Dinani, van der Harst, et al., 2023). Penambahan *xanthan*, *guar gum*, *carboxymethyl cellulose* dan *low acyl gellan gum* pada campuran PPI-WG menghasilkan daging analog yang struktur seratnya lebih jelas. Hal ini berbeda dengan penambahan *sodium alginate* dan *methylated pectin* yang tidak mengubah tekstur serat secara keseluruhan (Taghian Dinani, Broekema, et al., 2023). Kombinasi *L-cysteine* pada paduan PPI dan WG pada suhu 10 – 110 tidak terbentuk serat, pada suhu 120 – 140 terbentuk serat tipis dan pada 150 °C serat tidak tampak (Taghian Dinani, Allaire, et al., 2023).

Proses *shearing* dapat digunakan untuk membentuk daging analog yang berbahan dasar SPI. Penambahan *soybean pectin* (SYB) dan *high methyl citrus pectin* (HMC) menghasilkan struktur berserat. *Low methyl-esterified pectin* (LMC) yang dikombinasikan dengan SPI menghasilkan serat yang lebih sedikit dibandingkan *soybean pectin* sedangkan *sugar beet pectin* (SGB) tidak dapat menghasilkan serat (Snel et al., 2024). *High acyl gellan gum* yang ditambahkan pada SPI menghasilkan bentuk dengan serat yang besar, sedangkan *low acyl gellan gum* (LG), *high methoxyl pectin* (HP), *low methoxyl pectin* (LP), dan *Xanthan* (X) membentuk struktur serat médium (Taghian Dinani, Zhang, et al., 2023). SPI juga dapat dikombinasikan dengan *insoluble soy fiber* maupun *low acyl gellan gum* yang menghasilkan struktur serat pada daging analog (Taghian Dinani, de Jong, et al., 2023).

Bahan alternatif yang dapat pada proses *shearing* salah satunya adalah nangka muda. Penambahan bahan tersebut pada kombinasi SPI dan WG dapat menambah kelembaban, dan struktur pori daging analog (Taikerd & Leelawat, 2023). Selain itu *carragenan* juga dapat ditambahkan pada kombinasi PPI-WG yang berfungsi untuk meningkatkan *browning index*, *water holding capacity* dan *tensile stress* (Taghian Dinani, Charles Carrillo, et al., 2023). Proses HTSC campuran SPI-WG dapat dilakukan dengan kombinasi pemanasan maupun pendinginan. Pemanasan memberikan pengaruh positif namun pendinginan menyebabkan struktur produk menjadi berbentuk remah-remah sehingga tidak terbentuk serat (Köllmann et al., 2023).

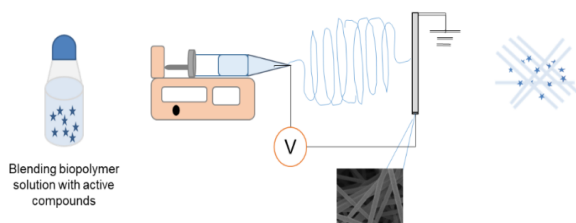
3.3. Spinning

Proses *spinning* daging analog dimulai dengan pembentukan serat daging dari larutan biopolimer, yang kemudian dijalin menggunakan mesin pemintal sehingga membentuk struktur daging yang utuh. Teknik *spinning* terdiri dari *wet spinning* dan *electrospinning*. Pada proses *wet spinning*, larutan biopolimer diekstrusi melewati alat pemintal (*spinneret*) yang diletakkan dalam cairan *non-solvent* sehingga terbentuk serat daging yang berukuran sekitar 10 μ m (Cui et al., 2022a).



Gambar 5. Prinsip dasar *wet spinning* (Cui et al., 2022a)

Teknik *electrospinning*, menghasilkan serat berukuran 100 nm dengan menggunakan pendekatan *electrohydrodynamic*. Larutan biopolimer didorong melalui jarum berongga atau spinneret yang memiliki potensial listrik relatif, sehingga larutan berubah menjadi serat sangat tipis yang tertarik ke elektroda *ground* (Gagaoua et al., 2022).



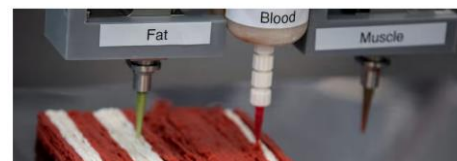
Gambar 6. Prinsip dasar *electrospinning* (Gagaoua et al., 2022)

Pada proses *spinning*, kombinasi SPI dan *sodium alginate* menghasilkan serat yang berukuran 30–100 μ m. Seiring dengan meningkatnya komposisi protein warnanya berubah dari transparan menjadi putih susu.

Water holding capacity (WHC) dalam kondisi asam lebih rendah dibandingkan pada kondisi netral dan basa (Cui et al., 2022b). Penggunaan *filler gelatin* dan *zein* pada material SPI dapat meningkatkan *tenderness* namun masih dibawah standar daging hewan (Nasrollahzadeh et al., 2023a). Penambahan *zein* 3% pada SPI mampu menghasilkan gel dengan sifat yang secara statistik mirip dengan daging ayam. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi tersebut memiliki potensi besar untuk membentuk tekstur daging ayam (Mattice & Marangoni, 2020). Tampilan visual daging analog dari proses *shearing* dan *spinning* dijelaskan dalam Tabel 2 dan 3.

3.4. 3D Printing

Teknologi terbaru dalam proses pembentukan daging analog adalah 3D printing atau juga dikenal dengan *additive manufacturing*. Metode printing yang digunakan pada pencetakan daging adalah *extrusion-based paste*. Pada proses ini pasta yang merupakan campuran protein nabati, bahan tambahan dan air dideposisi melalui *nozzle* untuk membentuk struktur serat daging lapis demi lapis (Tibrewal et al., 2023).



Gambar 7. Proses 3D printing daging analog (Meisenzahl Mary, 2020)

Sifat bahan yang mempengaruhi *printability* antara lain viskositas dan *rheology*. Kedua parameter tersebut sangat berkaitan dengan komposisi dan jenis bahan (Waseem et al., 2023). Pada kombinasi ISP, WG, RPI dan *canola oil* tekstur, akurasi dan stabilitas pencetakan dapat dikontrol dengan baik sehingga menghasilkan struktur daging yang berserat (Qiu et al., 2023). Penambahan *hydrocolloid* berupa *carragenan* dan *glucomanan* pada ISP menggunakan *coaxial nozzle* dapat juga dapat menghasilkan tekstur berserat dan *hardness* yang mendekati standar daging sapi (Ko et al., 2021). Sifat *hardness*, *stiffness*, *springiness*, *chewiness* dapat berkurang pada penggunaan bubuk jamur tiram, reishi, *safron milk cup* (SMC) pada pasta SPI-PPI, namun paduan ini dapat meningkatkan *juiciness* (Demircan et al., 2023). Sumber protein nabati lain yang memiliki *printability* cukup baik adalah MBPI. Penambahan *transglutaminase* 4 u/g protein, pada MBPI dan pemanggangan pada 170 $^{\circ}$ selama 25 menit menghasilkan daging analog yang mempunyai permukaan yang lembut dan memiliki *hardness* dan *springiness* yang menyerupai daging sapi (Wen et al., 2022b). Paduan MBPI, *methylcellulose* dan *xylose* sebagai pewarna menunjukkan tampilan visual yang

mendekati daging sapi, namun ketika dimasak warnanya menjadi lebih terang dan kekerasannya meningkat (Wen et al., 2022a). Gambaran daging analog yang dicapai dengan proses 3D printing ditampilkan pada Tabel 4.

3.5. Tampilan Visual

Hasil proses ekstrusi, *shearing*, *spinning* maupun *3D printing* secara visual ditampilkan pada Tabel 1 - 4 di bawah ini.

Tabel .1. Tampilan visual daging analog yang dihasilkan melalui proses ekstrusi

Bahan	Produk daging analog	Referensi
PPI, SPC, SPI, RPI	<p>(PPI) (SPC) (SPI) (RPI)</p>	(Mao et al., 2024)
HPC, WG, CPC	<p>90:10 (HPC:WG) 70:30 (HPC:WG) 50:50 (HPC:WG) 100%WG 50:50 (HPC:CPC)</p>	(Zahari, Rinaldi, et al., 2023)
HPC + OFR	<p>(A1) Suhu 40 -130 °C Kelembaban 49 (A2) Suhu 40 -150 °C Kelembaban 49 (A3) Suhu 40 -150°C Kelembaban 52</p>	(Zahari, Purhagen, et al., 2023b)
DFMB	<p>50 % 115°C 50 % 125°C 50 % 135°C 50 % 145°C</p>	(De Angelis et al., 2023b)
LPI, LPC	<p>30:70 45% 30:70 55% 70:30 45% 70:30 55%</p>	(Ramos-Diaz et al., 2023b)
HWG, WG, SPC	<p>B5 HWG : SPC 40% : 60% B6 HWG : SPC 50% : 50% WG : SPC 40% : 60%</p>	(Zhang et al., 2023b)
PPI, sunflower protein (SP), fermented sunflower protein (FSP), Shifted FSP in pH 7 (FSP7)	<p>PPI+SP PPI+FSP PPI+FSP7</p>	(Pöri, Aisala, et al., 2023)
Re-work PPI dan re-work SPI	<p>fresh PPI re-work PPI fresh SPI re-work SPI</p>	(Snel et al., 2023b)

Bahan	Produk daging analog						Referensi
PPI, PPC, OB, WB							(Rekola et al., 2023b)

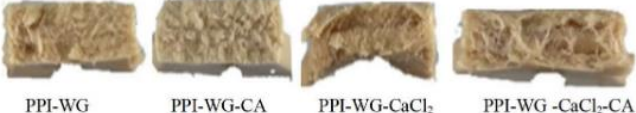

Proses *high moisture extrusion* (HME) pada PPI menghasilkan daging analog yang memiliki struktur serat tebal dan jelas sedangkan pada SPC menghasilkan serat yang tipis. Penerapan proses tersebut pada SPI menghasilkan gel yang padat, dan pada RPI struktur yang terbentuk rapuh. Dari keempat bahan tersebut *hardness* daging analog yang paling rendah adalah yang berbasis SPI (Mao et al., 2024). Pada penggunaan campuran HPC dan WG struktur serat paling baik dibentuk pada komposisi 50 : 50, sedangkan pada komposisi yang lain struktur serat rapuh dan tidak terlihat jelas. Hasil ekstrusi pada komposisi HPC:WG (90 : 10) daging analog yang terbentuk memiliki *hardness*, *resilience*, dan *chewiness* paling baik (Zahari, Rinaldi, et al., 2023). Kombinasi HPC dan OFR, ketika diekstrusi dapat tercampur dengan baik serta membentuk lapisan dan struktur serat. Peningkatan suhu menghasilkan lapisan yang lebih tipis dengan serat yang lebih besar (A1 dibandingkan dengan A2). Kelembaban yang lebih tinggi menghasilkan struktur yang lebih berpori dibandingkan kelembaban yang lebih rendah (A2 dibandingkan dengan A3) (Zahari, Purhagen, et al., 2023b). Hasil proses ekstrusi DFMB pada kelembaban 50% dengan suhu 115 -145⁰C menghasilkan daging analog yang membentuk struktur berbentuk V. Pada suhu yang lebih tinggi bentuk V lebih runcing dan struktur anisotropik terlihat lebih jelas. Selain itu peningkatan suhu juga meningkatkan *hardness*, *chewiness* dan *cohesion* (De Angelis et al., 2023b). Ekstrusi campuran LPI dan LPC pada komposisi 30:70 dan 70:30 mampu membentuk struktur rekahan. Pada

kadar air 45% struktur rekahan di sepanjang pusat geometris terlihat lebih jelas dibandingkan pada kadar air 55% (Ramos-Diaz et al., 2023b). Komposisi SPC 60% dan HWG 40% menghasilkan struktur serat yang banyak, jelas dan teratur, demikian pula pada kombinasi SPC 60% dan WG 40%. Pada parameter *hardness*, *chewiness*, and *toughness* komposisi HWG 40% lebih mendekati standard daging ayam dibandingkan komposisi 40%. Ketika HWG ditambahkan hingga 50%, serat yang terbentuk menjadi terpelintir dan saling bersilangan (Zhang et al., 2023b). Ekstrusi kombinasi PI dan SP (1:1) menghasilkan struktur serat yang tipis. Pada campuran PPI dan FSP (1:1) serat tipis yang terbentuk lebih rapuh. Hasil ekstrusi PPI + FSP7 (1:1) menunjukkan bahwa serat yang terbentuk lebih jelas, teratur dan kuat (Pöri, Aisala, et al., 2023). Penggunaan *re-work* SPI pada proses ekstrusi dapat membentuk serat, *cutting strength*, indeks anisotropi dan tampilan visual yang sama dengan produk dari *fresh* SPI. Pada *re-work* PPI ekstrusi menghasilkan struktur serat, tampilan visual dan indeks anisotropi yang sama namun mengurangi *cutting strength* dan *hardness* (Snel et al., 2023b). Paduan PPI dengan OB dan WB maupun PPC dengan OB dan WB pada persentase 15% menghasilkan daging analog yang memiliki struktur serat yang jelas dan teratur. *Cutting strength* dan *hardness* pada paduan berbasis PPI berkurang dengan adanya OB maupun WB. Secara keseluruhan penambahan kedua bahan tersebut tidak mengubah *in vitro protein digestibility* (Rekola et al., 2023b).

Tabel 2. Tampilan visual daging analog yang dihasilkan melalui proses *shearing*

Bahan	Tampilan visual				Ref
PPI, WG, CYS, AA					(Taghian Dinani, van der Harst, et al., 2023)

Bahan	Tampilan visual	Ref
PPI, WG, <i>xanthan (X), carragenan (CA), sodium alginate (SA), guar gum (GG), carboxymethyl cellulose (CMC), carboxymethyl cellulose (GZ), low methylated pectin (P), locust bean gum (LBG)</i>		(Taghian Dinani, Broekema, et al., 2023)
PPI, WG + 2% <i>L-cysteine</i>		(Taghian Dinani, Allaire, et al., 2023)
SPI, SYB, SGB, HMC, LMC		(Snel et al., 2024)
PPI, WG	<p>HTSC dengan pemanasan</p> <p>HTSC dengan pendinginan</p>	(Köllmann et al., 2023)
SPI <i>high acyl gellan gum (HG), low acyl gellan gum (LG), high methoxyl pectin (HP), low methoxyl pectin (LP), dan xanthan (X)</i>		(Taghian Dinani, Zhang, et al., 2023)
Nangka muda, WG, SPI		(Taikerd & Leelawat, 2023)

Bahan	Tampilan visual	Ref
PPI, WG, CA, CaCl ₂	 <p>PPI-WG PPI-WG-CA PPI-WG-CaCl₂ PPI-WG -CaCl₂-CA</p>	(Taghian Dinani, Charles Carrillo, et al., 2023)
SPI, <i>insoluble soy fiber</i> (ISF), <i>low acyl gellan gum</i> (LAG)	 <p>SPI- LAG 1% SPI- LAG 2% SPI- ISF 1% SPI- ISF 2% SPI- ISF 3%</p> <p>SPI- ISF 1%- LAG 1% SPI-ISF 2% - LAG 1% SPI- ISF 3% - LAG 1%</p> <p>SPI- -ISF 1%- LAG 2% SPI-ISF 2% - LAG 2% SPI- ISF 3% - LAG 2%</p>	(Taghian Dinani, de Jong, et al., 2023)

Proses *shearing* (120 °C, 25 mnt) pada daging analog berbasis kombinasi PPI-WG yang ditambahkan dengan SYS maupun AA 100 ppm menghasilkan produk yang berlapis namun tidak berserat. Serat mulai terbentuk dengan jelas pada komposisi 500 ppm. Penambahan SYS 2000 ppm menunjukkan produk yang memiliki serat jelas dan lebar, namun pada AA 2000 ppm serat yang terbentuk kecil-kecil. SYS meningkatkan *tensile stress*, *tensile strain* dan *young's modulus* selaras dengan penambahan konsentrasi. AA meningkatkan *browning indeks* namun tidak memberikan efek signifikan pada perubahan mekanis (Taghian Dinani, van der Harst, et al., 2023). Struktur yang terbentuk dari penambahan *hydrocolloid* (X, CA, SA, GG, CMC, GZ, P, LBG) pada daging analog berbasis PPI-WG secara keseluruhan menghasilkan struktur yang berserat (A struktur serat kecil, B struktur serat intermediate, C struktur serat yang berlapis). Pada konsentrasi 3% CMC daging analog tidak dapat terbentuk karena struktur yang terbentuk terlalu rapuh dan padat (Taghian Dinani, Broekema, et al., 2023). Pengaruh penambahan SYS 2% pada paduan PPI-WG dengan suhu (100, 110, 120, 130, 140, 150) °C menghasilkan daging analog yang beragam. HTSC pada suhu 100 – 110 °C tidak dapat membentuk serat, sedangkan pada suhu 120 – 130°C dapat menghasilkan serat yang panjang dan jelas. Produk yang dihasilkan pada suhu 140 – 150°C patah ketika dilipat, hal ini terjadi karena strukturnya menjadi lebih padat dan tidak elastis. Tampilan warna dari suhu 100°C hingga 130 °C, berangsur lebih terang dan dan kemudian menjadi lebih gelap lagi pada suhu yang lebih tinggi (Taghian Dinani, Allaire, et al., 2023).


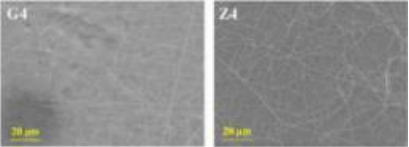
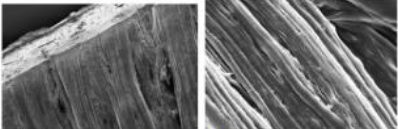
Penambahan pektin (SYB, SGB, LMC, HMC) 41,8 g/100 g SPI dengan *shear rate* 19.5 dan 39, suhu 140°C selama 15 menit berpengaruh terhadap pembentukan serat selama proses *shearing*. Kombinasi SPI-HMC menghasilkan struktur serat yang jelas dan teratur. Struktur serat anisotropik terbentuk dari SPI – SYB dengan *shear rate* 39, namun pada *shear rate* 19,5 serat tidak terlihat jelas. Demikian juga dengan campuran SPI – SGB (19,5) dan SPI – LMC (19,5 – 39)

pada kondisi tersebut serat tidak terbentuk dengan baik. Pada kombinasi SPI – SGB (39) menghasilkan struktur anisotropik yang rapuh sehingga terbentuk patahan (Snel et al., 2024). Proses HTSC dengan pemanasan 15 menit untuk kombinasi SPI-WG pada *shear rate* ≤ 30 rpm menghasilkan serat yang lebih jelas dan terstruktur dengan baik dibandingkan pada *shear rate* > 30 rpm. Pendinginan selama proses *shearing* pada *shear rate* 5 – 100, menyebabkan struktur yang terbentuk menjadi *flaky* dan tidak terbentuk serat (Köllmann et al., 2023). Penambahan 2% *hydrocolloid* (HG, LG, HP, LP, X) dan garam (0; 0,5%;1 %) pada SPI menghasilkan daging analog yang 4 jenis struktur yaitu (a) struktur serat lebar, (b) struktur serat intermediate, (c) struktur serat kecil dan tipis, dan (d) gumpalan tanpa serat. Pengaruh penambahan garam pada HP, LP dan X tidak terlalu memberikan pengaruh signifikan terhadap struktur serat, namun pada HG dan LG penambahan garam 1% menghasilkan serat yang lebih baik (Taghian Dinani, Zhang, et al., 2023). Proses *shearing* pada kombinasi angka muda, WG, SPI (1,0,0) menghasilkan daging analog yang lembut, lembab dan banyak pori. Pada komposisi (0,1,0) produk yang dihasilkan padat dan berlapis, sedangkan komposisi (0,0,1) lembut dan tanpa lapisan. Karakteristik *hardness* dan *chewiness* dikategorikan dalam 4 kategori yaitu daging analog dengan *hardness* dan *chewiness* rendah (a), *hardness* dan *chewiness* moderat (b), *hardness* moderat, dan *chewiness* tinggi (c), *hardness* dan *chewiness* tinggi (d) (Taikerd & Leelawat, 2023). Penambahan CA pada kombinasi PPI-WG tidak memberikan perubahan signifikan pada struktur makrosutruktur. Namun, CA berpengaruh pada campuran PPI-WG-CaCl₂ dimana struktur produk yang dihasilkan menjadi lebih berserat. Selain itu penambahan CA juga meningkatkan *browning index*, WHC, *tensile stress*, and *air bubble numbers* (Taghian Dinani, Charles Carrillo, et al., 2023). Proses HTSC pada SPI yang dikombinasikan dengan ISF tanpa adanya LAG menghasilkan produk yang padat seperti gel, namun memiliki struktur serat yang jelas dan teratur. Produk yang merupakan kombinasi SPI – LAG maupun SPI – ISF – LAG menunjukkan

adanya struktur serat yang pendek dan rapuh. Penambahan ISF 1-3% meningkatkan pembentukan serat yang dapat terlihat secara visual sedangkan

penambahan LAG menibulkan gelembung udara yang dapat merusak struktur daging analog (Taghian Dinani, de Jong, et al., 2023).

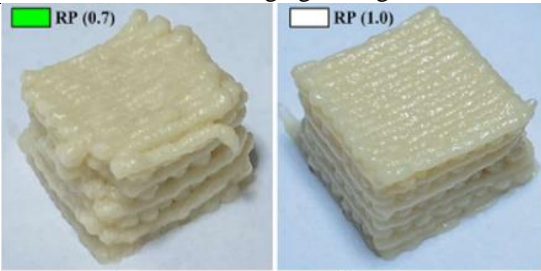

Tabel 3. Tampilan visual daging analog yang dihasilkan melalui proses *spinning*

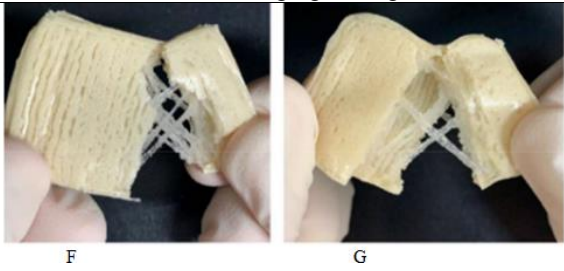
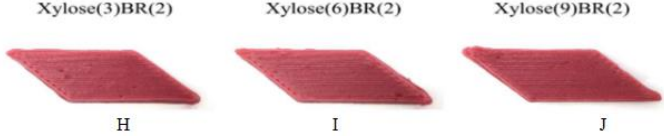
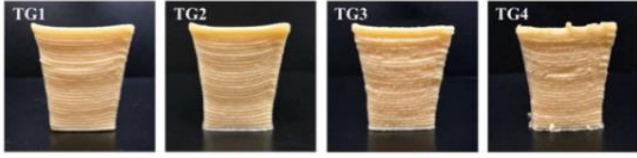
Bahan	Produk daging analog	Referensi
Sodium alginate + SPI	 SPI (2%) SPI (8%)	(Cui et al., 2022b)
SPI + filler Gelatin/Zein, MBPI + filler Filler Gelatin/Zein	 G4 Z4	(Nasrollahzadeh et al., 2023b)
SPI, Zein from maize	 Zein 3%	(Mattice & Marangoni, 2020)

Hasil proses *spinning* kombinasi SPI dan *alginate* menunjukkan bahwa serat dengan konsentrasi protein (2%) warnanya lebih transparan dibandingkan serat pada konsentrasi 8%. Struktur serat yang terbentuk pada konsentrasi protein yang lebih tinggi terlihat jelas dengan diameter yang lebih besar dibandingkan struktur serat pada konsentrasi yang lebih rendah (Cui et al., 2022b). Proses *electrospinning* gelatin dan *zein* secara individu dapat membentuk serat halus (G4 dan Z4). Kedua material tersebut ketika digunakan sebagai *filler*

pada daging berbasis MBPI, memberikan efek negatif pada sifat elastisitas. Pada daging analog berbasis SPI, kedua *filler* tersebut mampu meningkatkan *tenderness*, namun masih di bawah standar daging hewani (Nasrollahzadeh et al., 2023b). Penambahan *zein* 3% pada SPI menghasilkan serat kecil dan panjang berukuran 1,5 – 2 μm yang mampu membentuk kekerasan dan kekenyalan yang mendekati standar daging ayam (Mattice & Marangoni, 2020).

Tabel 4. Tampilan visual daging analog yang dihasilkan melalui proses *3D printing*

Bahan	Produk daging analog	Referensi
SPI, WG, RPI, minyak canola	 A B	(Qiu et al., 2023)
SPI, PPI, Minyak kelapa, <i>xanthan gum</i> , bubuk jamur reishi, tiram, dan SMC	 C (reishi) D (tiram) E (SMC)	(Demircan et al., 2023)

Bahan	Produk daging analog	Referensi
SPI, <i>carrageenan</i> (CG), <i>glucomanan</i> (GL)		(Ko et al., 2021)
MBPI, <i>methylcellulose</i> , pewarna (<i>xylose</i> , <i>beet red</i> (BR))		(Wen et al., 2022a)
MBPI, <i>methylcellulose</i> , <i>transglutaminase</i>		(Wen et al., 2022b)

Printability kombinasi SPI, WG, RPI dapat dideposisi dengan baik pada komposisi 1:1:0,7 (A) dan 1:1:1 (B). Struktur B lebih stabil dibanding A dan serat pada B terbentuk dengan lebih baik. Namun demikian, penambahan RPI mengurangi kualitas sensoris *hardness*, *springiness*, *cohesiveness*, *gumminess*, dan *chewiness* (Qiu et al., 2023). Bubuk jamur (*reishi*, *tiram*, SMC) yang ditambahkan pada paduan SPI dan PPI dapat dicetak sesuai bentuk desain, hanya saja pada penambahan *reishi* permukaan daging analog yang terbentuk lebih kasar dibandingkan dengan yang lain. Penggunaan ketiga jenis jamur tersebut dapat meningkatkan umami dan *juiciness*, namun menurunkan *hardness*, *stiffness*, *springiness*, dan *chewiness* (Demircan et al., 2023). Proses 3D *printing* menggunakan *coaxial nozzle* pada bahan utama SPI yang ditambahkan dengan CG dan GL pada komposisi 1,5;1,5 (F) dan 2,5;1,5 (G) menghasilkan serat yang kuat dan stabil. Elastisitas yang terbentuk dari kedua komposisi tersebut setelah proses pemanasan sebanding dengan daging sapi. Selain itu penambahan CG dan GL pada komposisi 2,5:1,5 dapat menghasilkan *hardness* yang mendekati standar daging sapi (Ko et al., 2021). Pada daging analog berbasis MBPI, *Xylose* yang digunakan sebagai pewarna dapat menghasilkan tampilan warna yang mendekati daging sapi (H,I,J) sebelum dilakukan *post processing*. Penambahan *xylose* juga meningkatkan stabilitas bentuk, *shear modulus*, dan kekerasan. Setelah daging analog mengalami pemanasan selama proses pemasakan warna berkurang tingkat kecerahannya dan kekerasannya juga meningkat (Wen et al., 2022a). Efek *Transglutaminase* pada daging analog berbasis MBPI dapat meningkatkan *printability* pada komposisi 1-2% (K-L). Pada komposisi 3-4 % serat yang terbentuk putus-putus sehingga permukaannya menjadi kasar (M-N). Permukaan yang halus dengan kekerasan yang baik

dapat dicapai pada komposisi 4 u/g MBPI (Wen et al., 2022b)

4. Kesimpulan

Daging analog merupakan produk dari protein nabati yang saat ini jumlah permintaannya terus meningkat. Proses produksi daging ini dapat dilakukan dengan metode *extrusion*, *shearing*, *spinning* ataupun 3D *printing*. Sumber utama protein nabati yang umum digunakan sebagai bahan dasar dari keempat proses tersebut adalah *soy protein isolate*, *pea protein isolate*, dan *wheat gluten*. Sumber protein lain dapat digunakan sebagai bahan tambahan seperti *mung bean protein isolate*, *rice protein isolate*, *zein*, dan *nanika muda*. Selain sumber protein, bahan *hydrocolloid* (*xanthan*, *guar gum*, *carrageenan*, *transglutaminase*, *methylcellulose* dll) dapat digunakan sebagai bahan yang dapat meningkatkan stabilitas serat dan bentuk daging analog. Karakteristik daging analog yang dihasilkan dengan proses *extrusion*, *shearing*, *spinning* memiliki fokus utama untuk mencapai standar kualitas serat, kekerasan dan *chewiness*. Pada produk yang dihasilkan dari proses 3D *printing*, tekstur berserat dapat dicapai dengan baik pada kombinasi bahan SPI, *carrageenan*, *glucomanan* yang menggunakan *nozzle coaxial*. Standar *hardness* dan *springiness* yang menyerupai daging sapi dapat dicapai dengan kombinasi MBPI dan *transglutaminase* 4 u/g protein.

Daftar Pustaka.

- Cui, B., Liang, H., Li, J., Zhou, B., Chen, W., Liu, J., & Li, B. (2022a). Development and characterization of edible plant-based fibers using a wet-spinning technique. *Food Hydrocolloids*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107965>
- De Angelis, D., Opaluwa, C., Pasqualone, A., Karbstein, H. P., & Summo, C. (2023a). Rheological

- properties of dry-fractionated mung bean protein and structural, textural, and rheological evaluation of meat analogues produced by high-moisture extrusion cooking. *Current Research in Food Science*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100552>
- Dekkers, B. L., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2018). Structuring processes for meat analogues. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 81, pp. 25–36). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.011>
- Demircan, E., Aydar, E. F., Mertdinc (Mertding), Z., Kasapoglu (Kasapoğlu), K. N., & Ozcelik (Özçelik), B. (2023). 3D printable vegan plant-based meat analogue: Fortification with three different mushrooms, investigation of printability, and characterization. *Food Research International*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113259>
- Du, Q., Tu, M., Liu, J., Ding, Y., Zeng, X., & Pan, D. (2023). Plant-based meat analogs and fat substitutes, structuring technology and protein digestion: A review. *Food Research International*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112959>
- Eswaran, H., Ponnuswamy, R. D., & Kannapan, R. P. (2023). Perspective approaches of 3D printed stuffs for personalized nutrition: A comprehensive review. In *Annals of 3D Printed Medicine* (Vol. 12). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2023.100125>
- Gagaoua, M., Pinto, V. Z., Göksen, G., Alessandrini, L., Lamri, M., Dib, A. L., & Boukid, F. (2022). Electrospinning as a Promising Process to Preserve the Quality and Safety of Meat and Meat Products. In *Coatings* (Vol. 12, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/coatings12050644>
- Imran, M., & Liyan, Z. (2023). Production of plant-based meat: functionality, limitations and future prospects. In *European Food Research and Technology* (Vol. 249, Issue 9, pp. 2189–2213). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04287-w>
- Ismail, I., Hwang, Y. H., & Joo, S. T. (2020). Meat analog as future food: A review. In *Journal of Animal Science and Technology* (Vol. 62, Issue 2, pp. 111–120). Korean Society of Animal Sciences and Technology. <https://doi.org/10.5187/jast.2020.62.2.111>
- Ko, H. J., Wen, Y., Choi, J. H., Park, B. R., Kim, H. W., & Park, H. J. (2021). Meat analog production through artificial muscle fiber insertion using coaxial nozzle-assisted three-dimensional food printing. *Food Hydrocolloids*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106898>
- Köllmann, N., Schreuders, F. K. G., Zhang, L., & van der Goot, A. J. (2023). On the importance of cooling in structuring processes for meat analogues. *Journal of Food Engineering*, 350. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111490>
- Mao, B., Singh, J., Hodgkinson, S., Farouk, M., & Kaur, L. (2024). Conformational changes and product quality of high-moisture extrudates produced from soy, rice, and pea proteins. *Food Hydrocolloids*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109341>
- Markets and markets. (2023, April). *Plant-Based Protein Market Global Forecast to 2028*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/Plant-Based-Protein-Market-14715651.html>
- Mattice, K. D., & Marangoni, A. G. (2020). Comparing methods to produce fibrous material from zein. *Food Research International*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108804>
- Mazumder, Md. A. R., Panpipat, W., Chaijan, M., Shetty, K., & Rawdkuen, S. (2023). Role of plant protein on the quality and structure of meat analogs: A new perspective for vegetarian foods. *Future Foods*, 8, 100280. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100280>
- Meisenzahl Mary. (2020, September 3). *A startup is 3D printing plant-based steaks to recreate the taste and texture of the real thing — see how they do it*. <https://www.businessinsider.com/define-meat-3d-printed-plant-based-faux-steaks-in-photos-2020-9>
- Nasrollahzadeh, F., Spotti, M. J., Skov, K., Mekonen, T., Chen, M., & Martinez, M. M. (2023a). Dispersion of low concentration of particulate or fibrillated protein fillers into plant protein melts and their impact on the elasticity and tenderness gap of plant-based foods. *Food Hydrocolloids*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108985>
- OECD FAO. (2021). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030*. https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2021-2030_19428846-en
- Ozturk, O. K., & Hamaker, B. R. (2023). Texturization of plant protein-based meat alternatives: Processing, base proteins, and other constructional ingredients. *Future Foods*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100248>
- Pöri, P., Aisala, H., Liu, J., Lille, M., & Sozer, N. (2023). Structure, texture, and sensory properties of plant-meat hybrids produced by high-moisture extrusion. *LWT*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114345>
- Pöri, P., Lille, M., Edelmann, M., Aisala, H., Santangelo, D., Coda, R., & Sozer, N. (2023). Technological and sensory properties of plant-based meat analogues containing fermented sunflower protein concentrate. *Future Foods*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100244>

- Qiu, Y., McClements, D. J., Chen, J., Li, C., Liu, C., & Dai, T. (2023). Construction of 3D printed meat analogs from plant-based proteins: Improving the printing performance of soy protein- and gluten-based pastes facilitated by rice protein. *Food Research International*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112635>
- Ramachandraiah, K. (2021). Potential development of sustainable 3d-printed meat analogues: A review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 2, pp. 1–20). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su13020938>
- Ramos-Diaz, J. M., Oksanen, S., Kantanen, K., Edelmann, J. M., Suhonen, H., Sontag-Strohm, T., Piironen, V., & Jouppila, K. (2023a). Characterization of texturized meat analogues containing native lupin flour and lupin protein concentrate/isolate. *Heliyon*, 9(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20503>
- Rekola, S. M., Kårlund, A., Mikkonen, S., Kolehmainen, M., Pomponio, L., & Sozer, N. (2023a). Structure, texture and protein digestibility of high moisture extruded meat alternatives enriched with cereal brans. *Applied Food Research*, 3(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100262>
- Sha, L., & Xiong, Y. L. (2020a). Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 102, pp. 51–61). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.022>
- Snel, S. J. E., Amroussi, Y., van der Goot, A. J., & Beyrer, M. (2023a). Rework Potential of Soy and Pea Protein Isolates in High-Moisture Extrusion. *Foods*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/foods12132543>
- Snel, S. J. E., Otto, K., Schlangen, M., Beyrer, M., & van der Goot, A. J. (2024). Type of pectin determines structuring potential of soy proteins into meat analogue applications. *Food Hydrocolloids*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109262>
- Taghian Dinani, S., Allaire, N., Boom, R., & van der Goot, A. J. (2023). Influence of processing temperature on quality attributes of meat analogues fortified with L-cysteine. *Food Hydrocolloids*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108422>
- Taghian Dinani, S., Broekema, N. L., Boom, R., & van der Goot, A. J. (2023). Investigation potential of hydrocolloids in meat analogue preparation. *Food Hydrocolloids*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108199>
- Taghian Dinani, S., Charles Carrillo, M. F., Boom, R., & van der Goot, A. J. (2023). Quality improvement of plant-based meat alternatives by addition of iota carrageenan to pea protein–wheat gluten blend. *European Food Research and Technology*, 249(6), 1637–1654. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04244-7>
- Taghian Dinani, S., de Jong, S., Vardhanabhuti, B., & van der Goot, A. J. (2023). Improving the quality of gluten-free plant-based meat analogs based on soy protein isolate with insoluble soy fibers and low acyl gellan gum. *European Food Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04391-x>
- Taghian Dinani, S., van der Harst, J. P., Boom, R., & van der Goot, A. J. (2023). Effect of L-cysteine and L-ascorbic acid addition on properties of meat analogues. *Food Hydrocolloids*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108059>
- Taghian Dinani, S., Zhang, Y., Vardhanabhuti, B., & Jan van der Goot, A. (2023). Enhancing textural properties in plant-based meat alternatives: The impact of hydrocolloids and salts on soy protein-based products. *Current Research in Food Science*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2023.100571>
- Taikerd, T., & Leelawat, B. (2023). Effect of young jackfruit, wheat gluten and soy protein isolate on physicochemical properties of chicken meat analogs. *Agriculture and Natural Resources*, 57(2), 201–210. <https://doi.org/10.34044/j.anres.2023.57.2.01>
- Tibrewal, K., Dandekar, P., & Jain, R. (2023). Extrusion-based sustainable 3D bioprinting of meat & its analogues: A review. In *Bioprinting* (Vol. 29). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2022.e00256>
- Waseem, M., Tahir, A. U., & Majeed, Y. (2023). Printing the future of food: The physics perspective on 3D food printing. *Food Physics*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.foodp.2023.100003>
- Wen, Y., Chao, C., Che, Q. T., Kim, H. W., & Park, H. J. (2023). Development of plant-based meat analogs using 3D printing: Status and opportunities. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 132, pp. 76–92). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.12.010>
- Wen, Y., Kim, H. W., & Park, H. J. (2022a). Effect of xylose on rheological, printing, color, texture, and microstructure characteristics of 3D-printable colorant-containing meat analogs based on mung bean protein. *Food Research International*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111704>
- Wen, Y., Kim, H. W., & Park, H. J. (2022b). Effects of transglutaminase and cooking method on the physicochemical characteristics of 3D-printable meat analogs. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103114>
- Zahari, I., Purhagen, J. K., Rayner, M., Ahlström, C., Helstad, A., Landers, M., Müller, J., Eriksson, J.,

& Östbring, K. (2023a). Extrusion of high-moisture meat analogues from hempseed protein concentrate and oat fibre residue. *Journal of Food Engineering*, 354.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111567>

Zahari, I., Rinaldi, S., Ahlstrom, C., Östbring, K., Rayner, M., & Purhagen, J. (2023). High moisture meat analogues from hemp – The effect of co-extrusion with wheat gluten and chickpea proteins on the textural properties and sensorial attributes. *LWT*, 189.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115494>

Zhang, X., Zhao, Y., Zhang, T., Zhang, Y., Jiang, L., & Sui, X. (2023a). Potential of hydrolyzed wheat protein in soy-based meat analogues: Rheological, textural and functional properties. *Food Chemistry: X*, 20.

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100921>