

Tinjauan Sistematis Tentang Pencetakan Makanan 3D: Perkembangan dari Konsep Menjadi Realita

A Systematic Review on 3D Food Printing: Progressing from Concept to Reality

Koushikha Namakkal Manivelkumar^{1*}, Chinnappan A Kalpana¹

¹Department of Food Science and Nutrition, Avinashilingam Institute for Home Science and Higher Education for Women, Coimbatore, Tamil Nādu, India

INFO ARTIKEL

Received: 14-09-2024

Accepted: 05-02-2025

Published online: 14-03-2025

*Koresponden:

Koushikha Namakkal

Manivelkumar

22phfnf003@avinuty.ac.in



DOI:

10.20473/amnt.v9i1.2025.176-185

Tersedia secara online:

[https://e-](https://e-journal.unair.ac.id/AMNT)

[journal.unair.ac.id/AMNT](https://e-journal.unair.ac.id/AMNT)

Kata Kunci:

Pembuatan Aditif, Formulasi

Makanan, Keberlanjutan

Makanan, Perencanaan

Makanan, Makanan 3D, Diet

Khusus

ABSTRAK

Latar Belakang: Teknologi pencetakan 3D memungkinkan terciptanya berbagai jenis makanan yang inovatif dan dapat dimakan, sehingga mendorong rantai makanan berkelanjutan serta nutrisi yang dipersonalisasi, sehingga memenuhi beragam permintaan pelanggan akan manufaktur aditif, sehingga meningkatkan kualitas produk makanan.

Tujuan: Aplikasi, kemajuan teknis, dan potensi masa depan terhadap pencetakan makanan 3D merupakan fokus utama tinjauan pustaka ini. Penelitian ini menyelidiki kemampuan adaptasi dan potensi transformatifnya dalam mengatasi masalah global seperti keberlanjutan dan nutrisi yang dipersonalisasi dengan mengevaluasi perkembangan terkini.

Metode: Penelitian tentang "3D Food Printing," "Food Technology," "Food Formulation," dan "Customized Diet" dari tahun 2018 hingga 2024 ditelusuri di PubMed, Google Scholar, dan Scopus untuk memastikan bahwa data yang disertakan adalah data terkini dan relevan. Setelah menghapus duplikat dan menerapkan filter, 31 laporan dipilih dari 687 hasil penelusuran untuk ekstraksi dan sintesis data.

Diskusi: Penelitian ini menekankan pada pemanfaatan printer makanan 3D untuk memproduksi produk susu, ikan dan daging, pasta, biskuit, coklat, dan makanan berbahan sereal. Aplikasinya ditemukan di berbagai sektor, termasuk makanan militer, rumah sakit, restoran, nutrisi untuk lansia dan anak sekolah, serta makanan antariksa. Beberapa bidang penelitian potensial di masa mendatang meliputi karakterisasi makanan melalui analisis warna, kadar air, aktivitas air, sifat fisikokimia, dan penelitian mikrobiologi.

Kesimpulan: Penelitian ini menyoroti potensi manfaat teknologi pencetakan makanan 3D, yang mencakup kemampuan untuk menyesuaikan pola makan, pengalaman bersantap yang baru, dan pilihan makanan yang lebih sehat. Penelitian ini menekankan potensi transformatifnya untuk memengaruhi ekonomi global sekaligus mengatasi tantangan keberlanjutan dan nutrisi yang dipersonalisasi.

PENDAHULUAN

Pencetakan 3D bahan makanan merupakan jenis manufaktur aditif yang menggunakan pembuatan lapisan berbantuan komputer. Produksi makanan memerlukan pemanfaatan perangkat lunak CAD, yang memungkinkan pengembangan model 3D atau integrasi sumber data elektronik lainnya. Hal ini memungkinkan terciptanya makanan dalam hampir semua bentuk yang diinginkan. Tinta yang dapat dimakan sering disimpan dalam jarum suntik plastik bermutu makanan dan kemudian disuntikkan secara bertahap melalui nosel yang terbuat dari bahan yang sama. Printer makanan 3D modern memungkinkan konsumen untuk mencetak makanan mereka dari jarak jauh melalui komputer, telepon pintar, atau perangkat *Internet of Things* (IoT) lainnya. Lebih jauh lagi, printer ini menyediakan pilihan resep. Eksplorasi

ruang angkasa dan perawatan kesehatan merupakan salah satu dari banyak bidang di mana makanan sangat menguntungkan, karena sangat mudah beradaptasi dalam hal bentuk, tekstur, warna, rasa, dan nutrisinya¹. Metode inovatif saat ini sedang dieksplorasi untuk mencapai ekonomi tanpa limbah, seperti konversi limbah makanan menjadi produk dengan nilai yang lebih tinggi. Makanan terbuang di setiap tahap proses produksi, termasuk budidaya, fabrikasi, pemrosesan, ritel, dan konsumsi rumah tangga. Rumah sering kali menjadi sumber utama sampah. Pencetakan makanan 3D (3DFP) adalah teknologi mutakhir yang berpotensi untuk mengatasi sampah makanan dari berbagai sumber secara efektif. Inovasi ini berkontribusi terhadap keberlanjutan lingkungan dengan menyediakan solusi potensial untuk sampah makanan dan kelangkaan sumber daya.

Masih banyak kendala yang mencegah orang untuk mempertimbangkan sampah makanan sebagai sumber makanan yang layak. Desain yang unik dan personal dapat dibuat menggunakan pencetakan 3D, yang dapat meningkatkan daya tarik dan penerimaan jenis sampah tertentu². Pencetakan makanan 3D adalah proses produksi yang menggabungkan gastronomi digital dan pencetakan 3D untuk memungkinkan kustomisasi makanan dalam hal bentuk, tekstur, rona, rasa, dan kandungan nutrisinya³. Hal ini memperluas berbagai pilihan kustomisasi yang tersedia untuk sektor memasak industri dan memperkenalkan keahlian artistik ke bidang kuliner mewah. Efek pencetakan makanan pada nutrisi yang dipersonalisasi, produksi makanan instan, teknologi persiapan makanan, dan perencanaan proses dijelaskan secara menyeluruh. Layanan ini dapat memberikan lebih dari sekadar solusi teknis untuk manajemen nutrisi yang dipersonalisasi dan perencanaan makanan saat digunakan dalam industri katering atau untuk memasak di rumah. Layanan ini sering kali memberikan peluang untuk mengatur ulang sistem distribusi makanan yang dipersonalisasi⁴. Industri pencetakan makanan 3D diantisipasi akan mengalami pertumbuhan substansial dalam skala global di tahun-tahun mendatang.

Pasar ini dicirikan oleh permintaan yang signifikan untuk makanan yang disesuaikan, yang sebagian besar diproduksi oleh individu yang memiliki keterampilan tertentu. 3DFP digunakan dalam industri makanan dalam berbagai kapasitas, seperti persiapan makanan dan pengembangan rencana diet yang dipersonalisasi di lembaga perawatan kesehatan, restoran, dan fasilitas pemrosesan makanan⁵. Pasar India cukup menguntungkan bagi teknologi pencetakan makanan 3D. Metode inovatif pencetakan makanan 3D memungkinkan produksi makanan sesuai permintaan, yang mendorong pengembangan produk baru dan memungkinkan penyesuaian. Individu dapat menghasilkan pengalaman bersantap yang inovatif, menikmati makanan segar dan bergizi, dan menyesuaikan preferensi makanan mereka melalui penggunaan teknologi⁶. Produk yang menghilangkan kebutuhan akan cetakan dan peralatan diproduksi melalui manufaktur pelapisan makanan, yang juga disebut sebagai pencetakan makanan 3D. Proses ini berpotensi menghasilkan industri baru, peluang kerja, dan pertumbuhan ekonomi. Pencetakan makanan 3D berpotensi mengatasi masalah global yang kritis, termasuk kerawanan pangan, pemborosan makanan, dan diet yang disesuaikan. Industri pencetakan makanan 3D mengalami pertumbuhan yang cepat, yang membutuhkan penerapan penelitian dan pengembangan yang tepat waktu. Pasar ini berkembang sebagai hasil dari meningkatnya kesadaran dan penerimaan konsumen terhadap masakan hasil cetak 3D. Pencetakan makanan 3D merupakan teknologi yang sangat populer karena potensinya untuk mengatasi berbagai masalah global yang mendesak. Implikasi seriusnya terhadap kesehatan, lingkungan, dan ekonomi, serta prospek pertumbuhannya yang menjanjikan, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi biaya produksi saat memproduksi produk makanan yang dipersonalisasi. Tujuan dari Tinjauan Literatur Sistematis (SLR) ini adalah untuk menilai status pencetakan makanan 3D saat ini, dengan penekanan khusus pada

aplikasinya, kemajuan teknologi, dan potensinya.

Pertanyaan Penelitian

1. Bagaimana teknologi pencetakan makanan 3D dapat diterapkan di berbagai industri?
2. Apa saja kemajuan teknologi pencetakan makanan 3D saat ini?
3. Bagaimana hal ini dapat membentuk perspektif masa depan dalam produksi makanan yang berkelanjutan dan personal?

METODE

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi keuntungan, solusi, dan tantangan yang terkait dengan penerapan praktis teknologi pencetakan makanan 3D. Untuk menyelidiki pertanyaan-pertanyaan ini, kami menerapkan standar Preferred Reporting Items Regarding Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Bagian ini memberikan penjelasan yang komprehensif tentang kriteria tersebut. Berikut ini adalah fase-fase kritisnya: menetapkan kriteria untuk pemilihan penelitian, melakukan ekstraksi data, mengevaluasi kualitas penelitian yang disertakan, merumuskan strategi pencarian, dan menentukan tujuan penelitian. Untuk mengidentifikasi penelitian yang relevan, investigasi ini menerapkan kriteria, frasa, dan parameter pencarian yang tepat untuk penyertaan dan pengecualian.

Kriteria Pencarian

Kata kunci berikut digunakan untuk melakukan pencarian komprehensif dari beberapa basis data daring, termasuk *PubMed*, *Google Scholar*, dan *Scopus*: ("3D food printing", "Food Formulation", "Food Sustainability", "freshly prepare meals" ATAU "Customized Diet"), ("current applications", "real-world uses", atau "commercial use"), ("technology advances", "recent developments"), ("benefits", "advantages", atau "challenges"), ("case studies", "success stories", atau "innovations"), dan ("market trends", "future potential", atau "predictions". Daftar periksa PRISMA (item 6) mengharuskan penulis untuk "menggambarkan fitur penelitian (misalnya, 3D food printing) dan melaporkan kriteria (misalnya, tahun yang dipertimbangkan, bahasa, status publikasi) yang digunakan sebagai persyaratan kelayakan, dengan memberikan justifikasi." Lebih jauh, metodologi yang dibatasi waktu ini diterapkan dalam investigasi ini untuk memastikan bahwa informasi terbaru dan relevan disertakan, sembari juga memantau beban kerja dan mencegah penyebaran informasi yang sudah ketinggalan zaman. informasi.

Kriteria Inklusi

1. Artikel ilmiah yang telah melalui peer review, artikel konferensi, tesis, dan disertasi.
2. Penelitian yang diterbitkan dalam 7 tahun terakhir (dari 2018 hingga 2024) untuk memastikan informasi terkini dengan fakta terkini dan relevan sambil memantau beban kerja dan menghindari informasi yang ketinggalan zaman.
3. Teknik dan teknologi pencetakan makanan 3D.
4. Penggunaan pencetakan makanan 3D dalam nutrisi, seni kuliner, diet yang dipersonalisasi, atau industri makanan.

5. Ilmu material yang terkait dengan tinta dan bahan makanan yang digunakan dalam pencetakan 3D.
6. Ulasan yang memberikan gambaran umum yang komprehensif tentang kemajuan mutakhir dalam pencetakan makanan 3D.

Kriteria Eksklusi

1. Editorial, opini, artikel berita, atau publikasi lain yang tidak melalui tinjauan sejawat.
2. Literatur abu-abu, seperti blog, situs web, dan kiriman media sosial.
3. Penelitian yang disebarluaskan dalam bahasa selain bahasa Inggris.
4. Penelitian yang tidak secara khusus berfokus pada pencetakan makanan 3D.
5. Penelitian yang sudah terlalu ketinggalan zaman dan tidak memberikan wawasan yang relevan tentang tren dan teknologi terkini.

Proses Penyaringan

Proses penyaringan melibatkan pendekatan dengan menggunakan pengambilan dan pemeriksaan artikel lengkap yang relevan dengan isu penelitian dan signifikansinya dalam pemahaman ekstraksi data dalam pencetakan makanan 3D. Artikel-artikel tersebut menjadi sasaran penilaian kritis dan penyaringan oleh para penulis. Relevansi, metodologi, keandalan, dan validitas data dinilai melalui pemeriksaan artikel-artikel tersebut. Selain itu, penilaian kualitas dilakukan, yang memerlukan identifikasi artikel-artikel yang relevan, penyaringan untuk kelayakan, ekstraksi data, dan penilaian kualitas, menggunakan faktor-faktor seperti keandalan, validitas,

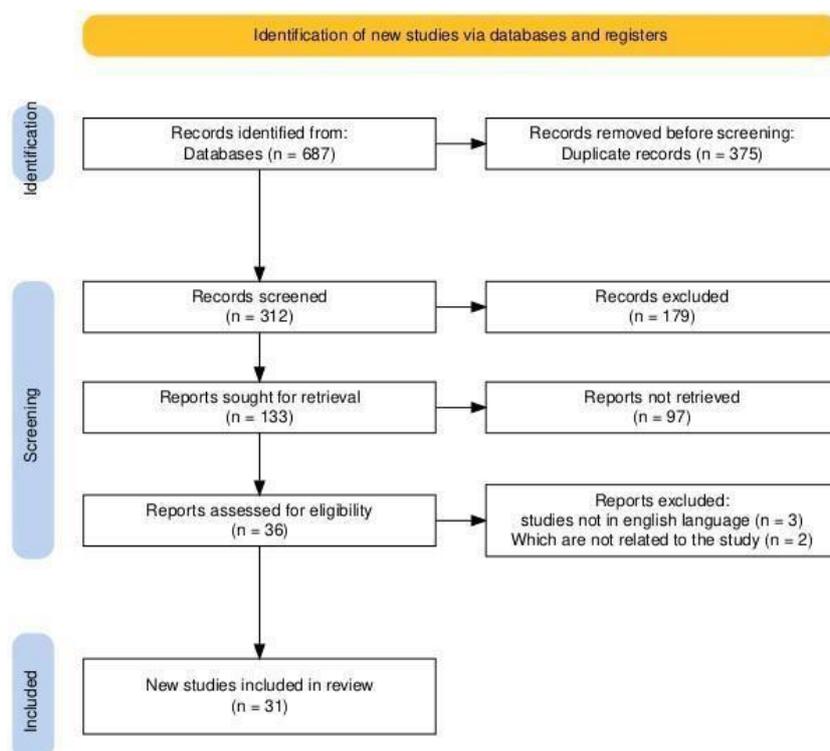
dan metodologi. Prosedur ini membantu dalam pengurangan bias dan jaminan hasil yang komprehensif dan representatif.

Ekstraksi Data

Sesuai dengan pernyataan PRISMA, ekstraksi data dikembangkan. Satu penulis, S.G., mengekstrak data yang relevan dari penelitian; dua penulis, S.G. dan MP, menilai pengkodean sesuai dengan cakupan standar pencetakan makanan 3D. Ketidaksepatan di antara penulis diselesaikan melalui diskusi. Data yang diterima mencakup hal-hal berikut: komponen pedoman, penulis/tahun, desain penelitian, ukuran sampel, latar/negara, kualitas penelitian, dan hasil yang konsisten.

DISKUSI

Sebanyak 687 artikel diambil dari beberapa basis data selama penelusuran pustaka utama yang disebutkan di atas. Pemeriksaan menyeluruh terhadap semua laporan dilakukan setelah item duplikat dihapus dari 375 laporan dan informasi signifikan secara klinis diidentifikasi melalui prosedur penyaringan. Penelitian ini mengecualikan lima artikel karena kontennya tidak relevan dan fakta bahwa artikel tersebut ditulis dalam bahasa selain bahasa Inggris. Ini diselesaikan setelah 179 materi disaring untuk mengidentifikasi informasi yang tidak relevan secara klinis, dan 97 laporan tidak dapat dipulihkan. Pemeriksaan menyeluruh dilakukan, yang mencakup 31 artikel. Diagram Alir PRISMA (Gbr. 1) menggambarkan hasil penelusuran pustaka utama.



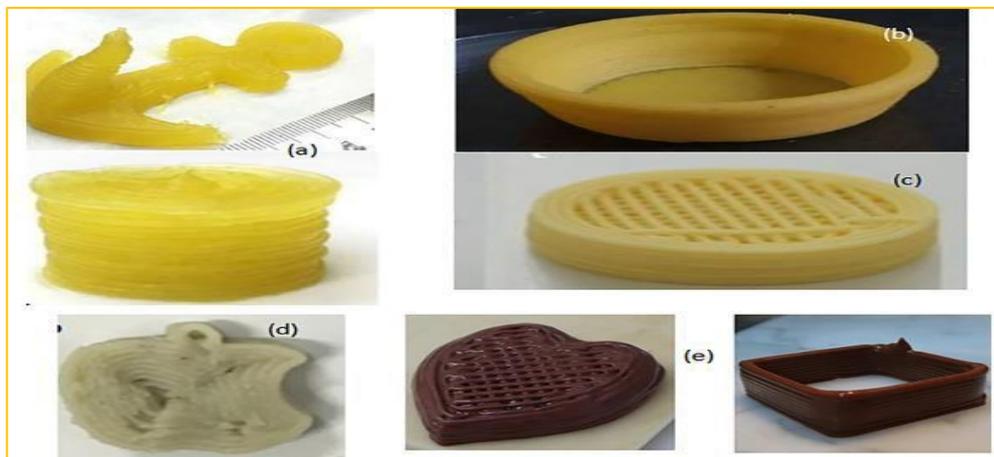
Gambar 1. Diagram Alur PRISMA

Pencetakan Makanan 3D

Percetakan 3D adalah proses manufaktur canggih yang berkembang pesat untuk memenuhi standar Industri 4.0. Bahan-bahan tersebut menyediakan fungsi vital dalam mencapai transformasi. Banyak penelitian telah dilakukan pada bahan-bahan pencetakan 3D, termasuk logam, nonlogam, dan polimer. Gambar 2 mengilustrasikan bagaimana pengembangan teknologi pencetakan makanan 3D dapat sepenuhnya merevolusi industri makanan dengan memungkinkan untuk memproduksi makanan yang berkelanjutan, individual, dan dapat disesuaikan. Jalan baru untuk desain, nutrisi, dan produksi makanan dimungkinkan oleh kapasitas untuk memanipulasi bentuk, tekstur, dan isi makanan secara tepat melalui pencetakan. Selain itu, beberapa bahan dengan aplikasi khusus juga telah dikembangkan.

Dalam penelitian tersebut, Tomislava (2021)⁷ memanfaatkan gel sari lemon dan pati kentang sebagai zat yang menunjukkan kadar air 59,82 g/100 g. Karakteristik termasuk viskositas, sifat viskoelastis dinamis, dan tegangan geser diperiksa dalam sebuah percobaan. Pencetakan gel sari lemon yang efektif mencapai kesimpulan yang sukses. Produk yang dicetak menggunakan sari lemon yang dibentuk gel terlihat pada Gambar 2(a). Anukiruthika dkk. (2019)⁸ memanfaatkan telur ayam dan beras yang digunakan sebagai substrat cetak. Mereka menggunakan beras sebagai sumber karbohidrat. Pengujian tersebut meliputi pemecahan telur dan penggunaan teknik Refractance Window Drying (RWD) untuk mengekstrak bubuk. Penelitian dilakukan untuk melihat kualitas unsur-unsur dan menemukan cara terbaik untuk menjalankan proses tersebut. Benda tersebut dibuat dengan teknologi printer 3D berupa telur, seperti yang terlihat pada Gambar 2(b). Liu dkk. (2019)⁹

memanfaatkan tepung terigu, bubuk mangga beku-kering, air, dan minyak zaitun sebagai bahan. Percobaan ini melibatkan pelaksanaan banyak pengujian pada adonan, baik secara sendiri-sendiri maupun dalam kombinasi dengan bahan-bahan lain. Hasil yang paling optimal diamati ketika mematuhi rasio tepung-ke-rasio. Proporsi air terhadap minyak zaitun terhadap bubuk mangga beku dalam produk akhir adalah 57,5:30:3:2,5, seperti yang digambarkan pada Gambar 2(c). Khemiga Khemacheevakul (2021)¹⁰ memanfaatkan cokelat Cadbury sebagai kancing cokelat susu. Metode tempering berbiji digunakan untuk melunakkan cokelat. Viskositas cokelat meningkat sebagai hasil dari proses ini. Banyak aspek diperiksa, termasuk perilaku reologi cokelat, tinggi nosel, dan ukuran bukaan nosel. Cokelat telah dicetak dalam berbagai bentuk sebagai produk akhir. Selain itu, telah ditunjukkan bahwa viskositas cokelat tetap konstan antara 3,5 dan 7 Pa dan antara 32 dan 40 derajat Celsius. Barang-barang yang diproduksi dengan pencetakan 3D cokelat Cadbury digambarkan pada Gambar 2(e). Wangetal. (2018) menggunakan natrium klorida dan gel surimi yang berasal dari ikan sebagai permukaan untuk pencetakan. Uji ini menyelidiki beberapa sifat: distribusi air, kekuatan gel, mikrostruktur gel surimi, dan kapasitas menahan air. Telah ditunjukkan dalam percobaan ini bahwa penambahan HCl memfasilitasi ekstrusi cepat bahan cetak dari nosel dan, setelah pengendapan, meningkatkan viskositasnya, memungkinkannya untuk mempertahankan bentuknya. Hasilnya dicetak dari gel surimi pada Gambar 2(d) menggunakan kecepatan nosel 32 mm/s dan konsentrasi NaCl 1,5 g/100 g¹¹.



Gambar 2. (a) Produk yang dibuat dari gel sari lemon dan kentang⁷, (b) Produk yang dibuat dari telur dan beras⁸, (c) Produk yang dibuat dari adonan, mangga kering, beku dan minyak zaitun⁹, (d) Bahan makanan dicetak dengan menjaga kecepatan nosel 32 mm/detik dan kadar NaCl 1,5/100 g¹⁰

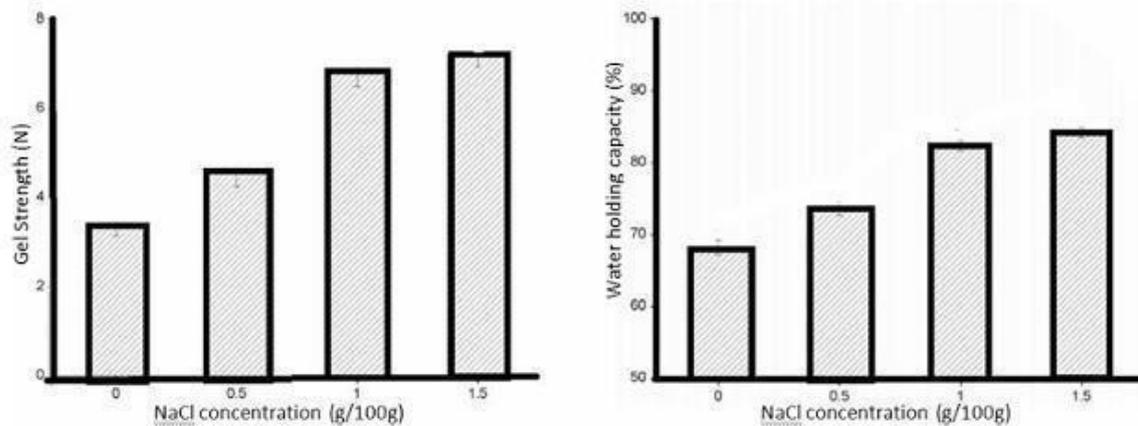
Gambar 3 (a) dan (b) menunjukkan kapasitas menahan air yang kuat untuk kandungan NaCl. Ini menunjukkan bagaimana kekuatan gel dan kapasitas retensi air dipengaruhi oleh konsentrasi NaCl. Memahami karakteristik gel dan kemungkinan penggunaan memerlukan pengetahuan tentang informasi ini. Peneliti dan pengembang dapat meningkatkan komposisi gel untuk aplikasi tertentu dengan memahami hubungan

antara kekuatan gel kandungan NaCl dan kapasitas menahan air. Misalnya, mereka dapat meningkatkan konsentrasi NaCl untuk meningkatkan kekuatan gel jika gel perlu lebih kaku atau mengurangi konsentrasi NaCl untuk meningkatkan kapasitas menahan air jika gel perlu lebih lembap Zhenbin et al. (2018)¹² dicetak- karagenan (KG) dan gom xantan (XG) gumata berat 0,06 g/100 g. Pertama, serpihan kentang dalam percobaan ini dimasuk

dalam air pada 4:1 kg terhadap XG.

Selain itu, keduanya digunakan untuk menghasilkan rasio 3:1. Setelah itu, campuran tersebut dicampur dengan kentang tumbuk dan sedikit air mendidih ($98 \pm 0,4$). Operasi pencampuran ini memakan waktu dua menit untuk diselesaikan. Hasil dari percobaan

ini adalah ujung kentang tumbuk yang berhasil dicetak 3D. Karakteristik tertentu, seperti kualitas reologi, jumlah pengisian, dan kondisi diperiksa. Metrik ini berdampak signifikan terhadap modulus Young, kekentalan, kekerasan, dan kekencangan.



Gambar 3. (a) Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap kekuatan gel dan (b) kapasitas menahan air¹³

Pisang, jamur kering, kacang putih kalengan, susu kering non-lemak, jus lemon, dan sebagai asam korbat digunakan oleh Derossietal. (2018)¹⁴. Dilakukan, perilaku reologi, dan faktor pencetakan lainnya. Akibatnya, produk. Produk cetakan yang sudah jadi memiliki 5–10% energi, vitamin, zat besi, dan kalsium yang dibutuhkan anak usia 3–6 tahun. Sever initial. (2018)¹⁵ telah menggunakan alpukat wortel, pir, kiwi, brokoli, dan nasi. Setelah itu, buah-buahan ini digabungkan pada fraksi massa 1,5%, 45%, 7%, dan 36,5%. Baik karakteristik morfologi dan mikrostruktur diamati. Selama delapan hari pada suhu 5C, antioksidan, mikrobiologi, dan karakteristik sensorik juga diamati. Produk jadi dengan bentuk piramida dicetak 3D menggunakan bahan buah ini. Menurut Zhu et al. (2019)¹⁶, pure tomat, selai Nutella, pasta Speculoos asli, mayones, selai daging ayam Argeta, dan selai vegetarian Zonnatura semuanya memiliki rasa alami. Tomat yang dihaluskan diputar selama 20 menit pada suhu 20 derajat Celsius dengan gaya 1000–10.000 gram. Mereka menyimpulkan bahwa tegangan aliran dapat digunakan untuk memperkirakan bagaimana sesuatu akan berfungsi saat dicetak 3D dengan bahan makanan berbasis air setelah memeriksa Kepadatan, kandungan bahan kering, fraksi volume relatif, amplitudo tegangan, creep, dan karakteristik reologi. Park dkk. (2020)¹³ menggunakan wortel, natrium alginat, kalsium klorida dehidrasi, sukrosa, bubuk agar, dan gelatin. Mereka selanjutnya menggunakan air kelapa dan media Murashige & Skoog (MS) yang dilengkapi dengan vitamin Gamborg. Dispersi sel wortel digabungkan dengan larutan agarosa dalam rasio 1:2, 1:1, dan 2:1 (b/b%) untuk memfasilitasi pencetakan 3D. Penelitian difokuskan pada viskoelastisitas dinamis, kapasitas pengawetan, densitas optik, dan parameter reologi. Data menunjukkan bahwa sampel 2:1 memiliki hasil yang lebih buruk dibandingkan dengan sampel 1:1, sedangkan sampel 1:2 menunjukkan kemampuan cetak dan kesesuaian struktural yang sangat baik.

Bahan Percetakan

Banyak bahan yang diteliti dan ditemukan dapat dicetak dalam makanan tradisional dan bahan yang dapat dicetak secara lokal. Lapisan gula kue, cokelat, hummus, dan keju termasuk makanan yang dicetak secara alami yang mudah dikeluarkan dari jarum suntik¹⁷. Makanan tradisional, seperti nasi, daging, buah-buahan, dan sayuran yang tidak dapat dicetak, termasuk dalam kategori ini. Banyak penelitian juga dilakukan untuk meningkatkan kemampuan cetak makanan tradisional dengan menambahkan gom seperti gom xanthan atau hidrokoloid tertentu¹⁸. Namun, upaya sedang dilakukan untuk menggunakan resep-resep tersebut agar kategori masakan tradisional ini dapat diunduh. Resep-resep ini sekarang tersedia atau dibuat dengan sedikit penyesuaian yang menghilangkan kebutuhan akan bahan kimia¹⁹. Hao Jiang dkk.²⁰ menyelidiki sifat-sifat reologi senyawa yang digunakan untuk pencetakan makanan dalam 3D dan spesifikasi yang diperlukan untuk memprediksi dan meningkatkan kemampuan pencetakan dan kapasitasnya untuk pencetakan berbasis ekstrusi secara otonom. Pencetakan makanan 3D, sebagai pendekatan inovatif, memiliki janji signifikan untuk sepenuhnya mengubah beberapa bidang produksi makanan. Escalante-Aburto dkk.²¹ mengamati bagaimana teknologi ini dapat meningkatkan tampilan makanan, yang akhir-akhir ini menjadi penggunaan paling populer untuk pencetakan 3D. Akhirnya, mereka menawarkan visi yang berwawasan ke depan dan berorientasi pada perspektif teknologi ini. Untuk memenuhi janji 3DFP dalam meningkatkan kesehatan manusia, disebutkan pula karakter multidisiplinnya dan merekomendasikan area-area yang perlu ditangani dengan tantangan sosial dan regulasi. Kategori terakhir ini akan menjadi krusial karena konsumen menjadi lebih sadar kesehatan.

Kualitas yang telah diselidiki oleh banyak akademisi, serta penelitian tentang berbagai bahan yang digunakan dalam pencetakan 3D, dirinci dalam Tabel 1.

Tabel 2 berisi konstruksi yang dapat dicetak yang dihasilkan di bawah kategori makanan pokok (beras), ikan, telur, produk sampingan, dan buah. Persyaratan reologi untuk kemampuan aliran melalui nosel printer harus dipenuhi setiap kali bahan dipertimbangkan untuk dicetak. Lebih jauh, bahan tersebut memiliki sifat mekanis yang diperlukan untuk memastikan pelestarian struktur yang dicetak dan mencegahnya runtuh di bawah

beban beberapa lapisan yang dicetak. Untuk menentukan apakah suatu bahan cocok untuk dicetak, penting untuk memiliki pemahaman yang komprehensif tentang karakteristiknya. Akibatnya, berbagai teknik, seperti uji reologi, analisis profil tekstur, Scanning Electron Microscopy (SEM), Nuclear Magnetic Resonance (NMR), dan lainnya, sering digunakan untuk mengkarakterisasi media cetak.

Tabel 1. Bahan yang digunakan untuk Pencetakan Makanan 3D dan Properti yang Diselidiki

Kategori	Bahan yang Digunakan untuk Mencetak	Sifat Material yang Dipelajari	Referensi
Buah	Makanan ringan yang terdiri dari 73,5% pisang yang dihaluskan, 15% kedelai kalengan, 6% susu kering non-lemak, 3% jus lemon, 2% jamur kering, dan 0,5% asam askorbat, totalnya 70%, beserta larutan pektin sebanyak 30%.	Pengukuran reologi (viskositas dan viskositas nyata), mikrotomografi terkomputasi sinar-X, dan data antropometrik (tinggi dan berat)	22
Sayur	Bahan cetak kentang meliputi Kentang Tumbuk (MP), Pati Kentang (PS-0%, 1%, 2%, 4%), dan trehalosa 15%.	Distribusi air menggunakan Resonansi Magnetik Nuklir (NMR) dan fitur G0, G00, dan kehilangan tangen.	23
Makanan pokok	Gel beras merah mengandung agar (AG), natrium karboksimetil selulosa (NMC), gom guar (GG), tepung beras merah dan gom xanthan (XG).	Resonansi Magnetik Nuklir Medan Rendah (LF-NMR)—distribusi kelembapan, analisis tekstur (kekerasan, kekentalan, kekenyalan, kekompakan), parameter reologi (G0, G00, tangen kehilangan, viskositas nyata, indeks perilaku aliran, dan indeks konsistensi), serta fitur mikrostruktur dengan Mikroskopi Elektron Pemindaian (SEM).	24
Pemanfaatan produk sampingan	Pengolahan hasil samping kentang dan ubi dengan berbagai perbandingan (0:10, 1:9, 2:8, dan 3:7).	sifat reologi, sifat tekstur, dan parameter fisikokimia (WAI—Indeks Penyerapan Air, WSI—Indeks Kelarutan Air dan warna).	25
Ikan	Gel surimi ikan dibuat dengan daging ikan mas perak segar dan NaCl berkisar antara 0,5 hingga 2%.	Karakterisasi reologi (G0, G00, loss tangent), kekuatan gel (TPA), kapasitas menahan air (WHC), karakteristik struktur mikro (SEM), dan distribusi air (NMR)	1
Telur	Kuning telur, putih telur, tepung beras	Tegangan geser, laju geser, viskositas nyata, penganalisis tekstur (TPA penuh), pengukuran warna, dan aktivitas air merupakan contoh reologi.	8
Makanan fungsional (kaya protein)	Mentega, air, isolat protein kacang polong, dan tepung terigu.	Reologi, profil tekstur, kadar air, kadar protein, kemampuan menyerap minyak dan air, serta perilaku pencampuran semuanya diperhatikan.	27

Karakterisasi Makanan 3D Sifat Fisikokimia

Saat mengevaluasi keamanan dan kualitas makanan hasil cetak 3D, penting untuk memahami sifat fisikokimianya. Penelitian tambahan diperlukan untuk menilai kelayakan komersial, keamanan, dan kualitas prototipe makanan yang dapat dimakan guna memfasilitasi adopsi pencetakan makanan 3D secara luas. Dalam upaya untuk meningkatkan pemahaman kita tentang kualitas dan keamanan makanan, kita akan meneliti metodologi berbasis sains makanan yang lebih konvensional yang lebih akurat mendefinisikan makanan dalam sistem makanan 3D.

Kandungan Kelembaban

Kadar air yang optimal sangat penting untuk mencapai tampilan dan sensasi yang diinginkan. Kadar air sangat penting dalam mencegah pertumbuhan mikroba. Mengontrol kadar air dapat secara signifikan mengurangi

risiko penyakit bawaan makanan. Informasi untuk bahan tinta makanan dan barang cetakan telah dilaporkan dalam sejumlah kecil eksperimen FP 3D. Pendekatan oven kering sering digunakan untuk memastikan jumlah air dalam makanan tiga dimensi. Air memengaruhi beberapa karakteristik makanan penting, termasuk tekstur, berat, viskositas, masa simpan, dan keamanan mikrobiologi²⁵. Liu dan Severini sama-sama menggunakan teknik oven kering untuk menentukan kadar air; Severini menggunakan penimbangan gravimetrik dan Liu memanfaatkan standar nasional Tiongkok GB/T8858-88. Namun, pendekatan pengeringan vakum digunakan dalam penelitian dengan jus lemon²⁶. Menurut para peneliti tersebut, persentase kentang yang membentuk unsur-unsur tinta makanan mencakup 78 hingga 81%, termasuk wortel, pir, kiwi, brokoli, dan alpukat yang membentuk campuran, dan persentase jus lemon yang membentuk 73,5–88,9%²⁷. Selanjutnya, setelah prosedur pencetakan 3D, kadar air

dinilai. Kadar air tinta makanan berbasis jamur adalah 7,45% sebelum dicetak, dan meningkat menjadi 9,29% setelah diproses sebagai hasil penambahan air selama proses pembuatan tinta²⁸. Untuk meningkatkan karakteristik reologi, kemampuan cetak, dan kadar air dapat digunakan untuk mengubah viskositas makanan tanpa memerlukan bahan kimia¹⁵.

Aktivitas Air

Aktivitas air (Aw) adalah volume air yang tersedia untuk digunakan dalam proses kimia dan aktivitas mikrobiologi²⁹. Aktivitas air memengaruhi tekstur, rasa di mulut, dan pengalaman sensorik keseluruhan dari makanan yang dicetak 3D. Aktivitas air yang lebih tinggi dapat membuat produk terasa lebih lembap dan enak, sementara aktivitas air yang lebih rendah dapat menghasilkan tekstur yang lebih renyah atau kering. Aktivitas air merupakan elemen penting dalam menentukan potensi pertumbuhan mikroba. Mempertahankan aktivitas air yang rendah dapat meminimalkan risiko patogen bawaan makanan. Sebelum mencetak dan setelah mencetak, kadar aktivitas air untuk tinta makanan berbasis jamur dilaporkan masing-masing sebesar 0,60 dan 0,66³⁰. Peningkatan kecil dalam aktivitas air mengakibatkan terperangkapnya kelembapan di dalam jaringan serat saat pemrosesan. Tinta dan retensi air terikat meningkatkan kemampuan cetak dan aliran tinta makanan²⁸.

Meskipun demikian, masih ada ruang untuk penelitian lebih lanjut karena tidak ada artikel tambahan yang menjelaskan pergerakan hidrik dalam makanan 3D. Aktivitas air yang lebih rendah dapat menghambat pertumbuhan mikroba, sehingga memperpanjang masa simpan. Aw yang rendah (0,5) membuat makanan lebih rentan terhadap oksidasi dan ketengikan, sehingga menyebabkan kualitas yang lebih rendah dan memperpendek masa simpan, meskipun hal itu juga dapat menghambat pertumbuhan mikroba³¹. Perlakuan panas tambahan merupakan solusi potensial tetapi dapat berdampak negatif pada penampilan dan kualitas. Oleh karena itu, untuk menghasilkan hasil yang sangat baik, menyenangkan secara estetika, dan aman, pertimbangan yang cermat terhadap aktivitas air dalam makanan 3D harus diperhatikan³².

Warna

Warna merupakan faktor utama dalam penilaian pertama pelanggan terhadap kualitas dan daya tarik makanan; karenanya pengukuran warna makanan cetak 3D sangat penting. Beberapa penelitian telah dilakukan tentang bagaimana warna dipengaruhi oleh teknologi cetak 3D. Dalam karya Dankar, misalnya, sudut rona, kecerahan, dan karakteristik warna kroma diukur sebelum dan sesudah pencetakan dalam aplikasi bubuk kentang cetak tiga dimensi. Hasilnya menunjukkan bahwa proses cetak 3D tidak memengaruhi warna. Namun, aditif seperti agar dan alginat menurunkan tingkat kecerahan³². Sánchez dkk. (2018)³³ dan Keerthana et al. (2020)²⁸ memberikan nilai warna L, a, dan b untuk menunjukkan rentang warna dan kejernihan selain penelitian menggunakan keju 3D dan tinta jamur. Prosedur pencetakan dalam penelitian Le Tohic menghasilkan penurunan kecerahan permukaan keju

cetak. Lebih jauh, penelitian Keerthana menyelidiki dampak pencetakan dan microwave, dan menemukan bahwa pencoklatan enzimatis yang disebabkan oleh panas menyebabkan pengurangan kecerahan yang nyata. Hasil ini menunjukkan bahwa proses pencetakan 3D dapat memengaruhi keseluruhan. Dengan demikian, proses ini memiliki daya tarik yang luas terhadap makanan dan merupakan indikator pertama untuk membandingkannya dengan makanan konvensional.

Analisis Mikrobiologi Makanan 3D

Pengembangan metode sanitasi cepat untuk eliminasi bakteri merupakan tantangan kritis yang harus ditangani mengingat kemajuan ilmiah terbaru dalam penemuan 3D FP dan potensi komersialisasi lebih lanjut. Keamanan mikrobiologi merupakan salah satu topik terpenting yang diteliti dan diterapkan dalam pembuatan makanan tradisional. Infeksi bawaan makanan yang disebabkan oleh bakteri, ragi, dan jamur dapat disebabkan oleh sanitasi dan teknik penyimpanan yang buruk. Menurut Severini, Derossi, dkk. (2018)¹⁵, Plat menjalani pengujian dalam kondisi aerobik dan Modified Atmospheric Packing (MAP). Log CFU yang terdeteksi sebesar 3-5 untuk objek cetak 3D akhir tetap konsisten di kedua lingkungan, meskipun bahan baku disanitasi dengan cermat untuk mengurangi kontaminasi mikroba. Hal ini menunjukkan bahwa proses perencanaan dan pencetakan 3D mungkin berkontribusi besar terhadap kontaminasi mikroba. Investigasi mikrobiologi dalam percobaan ini dan penelitian lainnya difokuskan pada hasil akhir; tidak ada komponen printer yang diusap atau dinilai untuk mengetahui beban mikroba guna mengidentifikasi area berbahaya atau menentukan kemandirian kebersihan dan sanitasi.

Melalui denaturasi protein dan pengurangan tegangan permukaan, produk alkali dan surfaktan dapat digunakan sebagai agen pembersih pada permukaan yang bersentuhan dengan makanan untuk menghilangkan sisa makanan^{34,35}. Menyelidiki pembuatan dan karakteristik untuk solusi makanan untuk pencetakan 3D, dengan menekankan fitur material dan parameter pencetakan. Memahami dan mengatur variabel-variabel ini penting untuk menghasilkan makanan cetak 3D yang unggul dan efektif. Penelitian ini menekankan pentingnya kemampuan cetak tinta makanan, bergantung pada komposisi, struktur, dan kualitas fisikokimianya. Esai ini mengusulkan tinta standar untuk mutasi dan metrik kinerja, beserta rekomendasi untuk mengoptimalkan makanan cetak 3D. Penelitian sebelumnya kurang spesifik tentang desain dan fungsionalitas printer. Lebih jauh, material, hidrogen peroksida, elektrolisis air teroksidasi, dan terapi sinar UV termasuk di antara perawatan sanitasi yang dapat digunakan dalam pencetakan 3D. Meskipun tidak semua metode ini mungkin sesuai untuk peralatan 3D, kemandirian Prosedur ini untuk penggunaan FP 3D memerlukan modifikasi. dinilai dan diverifikasi. Permukaan kontak makanan pada printer 3D, seperti pompa, piston, ekstruder, tabung, platform pencetakan, dan lainnya dapat secara khusus ditargetkan untuk penanaman dan pengolesan sebelum perawatan³⁶.

Kelebihan dan Kekurangan Penelitian

Artikel ini mempertimbangkan literatur yang relevan antara tahun 2018 dan 2024. Penelitian terkait tentang pembuatan makanan dalam penggunaan teknologi 3D dan potensi pengembangan masa depan dalam makanan luar angkasa, orang tua, perlengkapan militer, rumah sakit, dan sekolah disajikan. Tinjauan ini menunjukkan peran analisis makanan secara teknologi dan fisikokimia berdasarkan faktor variabel seperti warna, keamanan mikroba, dan jumlah air yang ada. Tinjauan ini juga memberikan visi baru tentang masa depan pencetakan makanan 3D - mulai dari bahan baru dan peningkatan rasa hingga peningkatan konsistensi. Tinjauan literatur dibatasi pada literatur yang diterbitkan, tidak termasuk literatur abu-abu atau penelitian yang sedang berlangsung, di mana nilai tren yang muncul atau penelitian yang tidak dipublikasikan dapat terlewatkan. Konteks praktis juga membatasi temuan berdasarkan kurangnya data primer. Tinjauan ini tidak mempertimbangkan tantangan regulasi dan hukum, hanya berfokus pada kemajuan teknologi tanpa implikasi sosial-ekonomi, budaya, dan etika untuk keberhasilannya. Temuan ini mungkin terlalu umum untuk diterapkan di berbagai industri, mungkin kehilangan beberapa kebutuhan industri tertentu untuk mengatasi tantangan masing-masing.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyoroti potensi 3D FP sebagai teknologi pengubah permainan dalam industri makanan, yang menawarkan cara-cara kreatif untuk menyesuaikan makanan, meningkatkan keamanan makanan, dan mengurangi limbah makanan. Karakteristik bahan, termasuk ukuran partikel dan karakteristik reologi, berdampak langsung pada pembuatan makanan menggunakan manufaktur aditif. Penelitian tentang bahan nutrisi yang dapat dicetak menggunakan printer 3D telah dilakukan baru-baru ini. Hampir tidak ada banyak partisipasi manusia dalam terobosan ini, dan fitur-fitur yang terkait dengan klien akhir dalam hal esensial tradisional ini, kadar air, aktivitas air, warna, dan mikrobiologi makanan cetak 3D untuk keamanan dan kualitasnya. Calon prospek sedang menyelidiki bahan dan metodologi baru untuk meningkatkan rasa, konsistensi, dan kandungan nutrisi. Penelitian ini menyoroti meningkatnya signifikansi 3D FP dalam memengaruhi masa depan bisnis makanan dan penelitian dan pengembangan tambahan untuk memanfaatkan kemampuannya. Penelitian di masa mendatang harus difokuskan pada pengembangan bahan makanan yang dapat dicetak secara berkelanjutan menggunakan printer 3D dengan nilai gizi tinggi dan profil rasa yang sangat diinginkan. Penekanan lebih lanjut sangat penting pada pengoptimalan kemampuan cetak dalam produksi makanan pada skala industri. Mengintegrasikan AI dan pembelajaran mesin ke dalam proses pencetakan makanan 3D juga diprediksi akan menambah presisi, mengotomatiskan kustomisasi, dan memprediksi perilaku makanan selama produksi dan konsumsi, yang mengarah pada cara memproduksi makanan yang lebih efisien dan personal.

ACKNOWLEDGEMENT

Para penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada semua individu dan organisasi yang berkontribusi pada penelitian ini. Ucapan terima kasih khusus kepada tim peneliti atas upaya mereka yang tak kenal lelah dalam pengumpulan data, analisis, dan penyusunan. Selain itu, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada lembaga terkait atas bantuan mereka dalam menyediakan sumber daya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan penelitian sistematis ini.

KONFLIK KEPENTINGAN DAN SUMBER PENDANAAN

Penulis penelitian mengungkapkan bahwa mereka tidak memiliki konflik kepentingan. Tidak ada hibah khusus dari lembaga pendanaan pemerintah, swasta, atau nirlaba yang diperoleh untuk penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

KNM: konseptualisasi, penelusuran pustaka, metodologi, penulisan-draf asli, supervisi; CAK: investigasi, kontribusi diskusi, penulisan-tinjauan dan penyuntingan.

REFERENSI

1. Peshave, J. milind & Hodlur, A. S. 3D printing-the future In culinary arts! *Multi-Disciplinary Journal* **1**, 1–7 (2022). Available at https://www.researchgate.net/publication/362568506_Multi-DisciplinaryJournal_3D_Printing-The_Future_In_Culinary_Arts_Introduction.
2. Zhang, Y. *et al.* Systematic engineering approach for optimization of multi-component alternative protein-fortified 3D printing food Ink. *Food Hydrocolloids* **131**, 107803 (2022). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268005X2200323X>.
3. Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E. L., Sepulcre, F. & Pujolà, M. 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in Food Science & Technology* **75**, 231–242 (2018). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224417304818>.
4. Mantihal, S., Kobun, R. & Lee, B.-B. 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science* **22**, 100260 (2020). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878450X20301372>.
5. Zhang, J. Y., Pandya, J. K., McClements, D. J., Lu, J. & Kinchla, A. J. Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **62**, 4752–4768 (2022). Available at <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2021.1878103>.
6. Piyush, Kumar, R. & Kumar, R. 3D printing of food materials: A state of art review and future applications. *Materials Today: Proceedings* **33**, 1463–1467 (2020). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320307318>.

7. Vukušić Pavičić, T., Grgić, T., Ivanov, M., Novotni, D. & Herceg, Z. Influence of flour and fat type on dough rheology and technological characteristics of 3D-printed cookies. *Foods* **10**, 193 (2021). Available at <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/1/193>.
8. Anukiruthika, T., Moses, J. A. & Anandharamakrishnan, C. 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *Journal of Food Engineering* **265**, 109691 (2020). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877419303231>.
9. Liu, Y., Liang, X., Saeed, A., Lan, W. & Qin, W. Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* **54**, 9–18 (2019). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S146685641831289X>.
10. Khemacheevakul, K. Manufacture and characterization of 3D-printed sugar-reduced layered chocolates and their sensory perception. (Department of Agricultural, Food and Nutritional Science, University of Alberta, Canada, 2021). Available at <https://era.library.ualberta.ca/items/6a653417-dfba-4264-bc0f-037c062cbe31>.
11. Wang, L., Zhang, M., Bhandari, B. & Yang, C. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing. *Journal of Food Engineering* **220**, 101–108 (2018). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877417300742>.
12. Liu, Z., Dick, A., Prakash, S., Bhandari, B. & Zhang, M. Texture modification of 3D printed air-fried potato snack by varying its internal structure with the potential to reduce oil content. *Food Bioprocess Technol* **13**, 564–576 (2020). Available at <http://link.springer.com/10.1007/s11947-020-02408-x>.
13. Santini, C., Johnson, C. & Cavicchi, A. Design and food robots: Changing processes in the restaurant industry. in *Transdisciplinary Case Studies on Design for Food and Sustainability* 97–114 (Elsevier, 2021). doi:10.1016/B978-0-12-817821-8.00005-9. Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128178218000059>.
14. Derossi, A., Caporizzi, R., Azzollini, D. & Severini, C. Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. *Journal of Food Engineering* **220**, 65–75 (2018). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877417302133>.
15. Severini, C., Derossi, A., Ricci, I., Caporizzi, R. & Fiore, A. Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects. *Journal of Food Engineering* **220**, 89–100 (2018). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877417303643>.
16. Zhu, S., Stieger, M. A., Van Der Goot, A. J. & Schutyser, M. A. I. Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* **58**, 102214 (2019). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1466856419308811>.
17. Liu, Z., Bhandari, B., Prakash, S., Mantihal, S. & Zhang, M. Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing. *Food Hydrocolloids* **87**, 413–424 (2019). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268005X18311688>.
18. Thangalakshmi, S., Arora, V. K., Kaur, B. P. & Malakar, S. Investigation on rice flour and jaggery paste as food material for extrusion-based 3D printing. *J. Food Process. Preserv.* **45**, (2021). Available at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.15375>.
19. Derossi, A., Caporizzi, R., Paolillo, M. & Severini, C. Programmable texture properties of cereal-based snack mediated by 3D printing technology. *Journal of Food Engineering* **289**, 110160 (2021). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877420302570>.
20. Jiang, H. *et al.* 3D food printing: Main components selection by considering rheological properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **59**, 2335–2347 (2019). Available at <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2018.1514363>.
21. Escalante-Aburto, A., Trujillo-de Santiago, G., Álvarez, M. M. & Chuck-Hernández, C. Advances and prospective applications of 3D food printing for health improvement and personalized nutrition. *Comprehensive Review Food Science Food Safe* **20**, 5722–5741 (2021). Available at <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1541-4337.12849>.
22. Liu, Z., Bhandari, B., Prakash, S. & Zhang, M. Creation of internal structure of mashed potato construct by 3D printing and its textural properties. *Food Research International* **111**, 534–543 (2018). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996918304435>.
23. Huang, M., Zhang, M. & Guo, C. 3D printability of brown rice gel modified by some food hydrocolloids. *Journal of Food Process Preservation* **44**, (2020). Available at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.14502>.
24. Feng, C., Zhang, M., Bhandari, B. & Ye, Y. Use of potato processing by-product: Effects on the 3D printing characteristics of the yam and the texture of air-fried yam snacks. *LWT* **125**, 109265 (2020). Available at

- <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002364382030253X>.
25. Hussain, S., Arora, V. K. & Malakar, S. Formulation of protein-enriched 3D printable food matrix and evaluation of textural, rheological characteristics, and printing stability. *J. Food Process. Preserv.* **45**, (2021). Available at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfp.p.15182>.
 26. Liu, Y. *et al.* Applicability of rice doughs as promising food materials in extrusion-based 3D printing. *Food Bioprocess Technol* **13**, 548–563 (2020). Available at <http://link.springer.com/10.1007/s11947-020-02415-y>.
 27. Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B. & Liu, Y. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *LWT* **87**, 67–76 (2018). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0023643817306242>.
 28. Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B. & Yang, C. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing. *Journal of Food Engineering* **220**, 76–82 (2018). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877417301644>.
 29. Keerthana, K., Anukiruthika, T., Moses, J. A. & Anandharamakrishnan, C. Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: A study on button mushroom. *Journal of Food Engineering* **287**, 110116 (2020). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877420302144>.
 30. Kowalska, H. *et al.* Shaping the properties of osmo-dehydrated strawberries in fruit juice concentrates. *Applied Sciences* **13**, 2728 (2023). Available at <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/4/2728>.
 31. Dhaliwal, H. K., Gänzle, M. & Roopesh, M. S. Influence of drying conditions, food composition, and water activity on the thermal resistance of *Salmonella enterica*. *Food Research International* **147**, 110548 (2021). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996921004476>.
 32. Jackson, V. & Penumetcha, M. Dietary oxidised lipids, health consequences and novel food technologies that thwart food lipid oxidation: An update. *Int J of Food Sci Tech* **54**, 1981–1988 (2019). Available at <https://academic.oup.com/ijfst/article/54/6/1981/7805458>.
 33. Sánchez-Maldonado, A. F., Lee, A. & Farber, J. M. Methods for the control of foodborne pathogens in low-moisture foods. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **9**, 177–208 (2018). Available at <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-food-030117-012304>.
 34. Dankar, I., Haddarah, A., Sepulcre, F. & Pujolà, M. Assessing mechanical and rheological properties of potato puree: Effect of different ingredient combinations and cooking methods on the feasibility of 3D printing. *Foods* **9**, 21 (2019). Available at <https://www.mdpi.com/2304-8158/9/1/21>.
 35. Zhang, J. Y., Pandya, J. K., McClements, D. J., Lu, J. & Kinchla, A. J. Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **62**, 4752–4768 (2022). Available at <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2021.1878103>.
 36. Le Tohic, C. *et al.* Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese. *Journal of Food Engineering* **220**, 56–64 (2018). Available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877417300420>.