



Ipari fermentációs lehetőségek az élelmiszerek és a sertéstakarmányok előállításában: Irodalmi áttekintés

HATVAN ZOLTÁN¹, KATU JIM KIOKO¹, PINTÉR GEORGINA², VARGA LÁSZLÓ², ÁSVÁNYI BALÁZS^{2*}

¹Széchenyi István Egyetem, Wittmann Antal Növény-, Állat- és Élelmiszer-tudományi

Multidiszciplináris Doktori Iskola, Mosonmagyaróvár

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3885-4904>

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-0722-9555>

²Széchenyi István Egyetem, Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar

Élelmiszertudományi Tanszék, Mosonmagyaróvár

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-2724-3648>

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7431-852X>

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4066-6248>

Email: asvanyi.balazs@sze.hu

*Corresponding author/Levelező szerző

Received/Érkezett: 2025.03.24.

Revised/Átdolgozva: 2025.04.29.

Accepted/Elfogadva: 2025.05.16.

Published/Megjelent: 2025.06.27.

ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány átfogó képet nyújt a fermentáció biológiai és technológiai háttéréről, valamint annak élelmiszer- és takarmányipari alkalmazási lehetőségeiről. Részletesen bemutatja a fermentáció történetét, típusait és azokat a mikrobiológiai, kémiai, illetve környezeti tényezőket, amelyek befolyásolják a folyamat sikerességét. Kiemelt figyelmet fordít a szilárd fázisú (SSF) és a folyékony fázisú fermentáció (LSF) összehasonlítására, különös tekintettel az ipari alkalmazhatóságra, költséghatékonyságra, valamint a fermentált termékek minőségére és egészségügyi hatásaira. Az LSF-technológia kifejezetten ígéretes a sertés- és baromfitakarmányozásban, ahol probiotikus és antimikrobiális hatása révén csökkentheti az antibiotikum-használatot és javíthatja az állatok emésztését, immunrendszerét, ill. teljesítményét. A fermentációs eljárások elősegítik a környezeti fenntarthatóságot is azáltal, hogy melléktermékeket és hulladékokat értékes takarmánnyá vagy bioüzemanyaggá alakítanak. Az új technológiák – mint az automatizálás, a mesterséges intelligencia vagy a genomikai eszközök – lehetővé teszik a fermentáció még pontosabb szabályozását és ipari optimalizálását. A fermentáció így kulcsszerepet kap a modern biotechnológiai fejlesztésekben és az egészségtudatos, fenntartható táplálkozási rendszerek kialakításában.

Kulcsszavak: takarmányozás, élelmiszeripar, szilárd fázisú fermentáció, folyékony fázisú fermentáció



1. A FERMENTÁLT ÉLELMISZEREK KIALAKULÁSA, ELTERJEDÉSE

A fermentálás szó a latin „fervere” igéből ered, amelynek jelentése „felforralni”. Ez a természetes folyamat évezredek óta alkalmazott módszer, amely mára fejlett biotechnológiai eljárássá alakult, szorosan követve az emberiség fejlődését (Marsh et al., 2014). Régészeti leletek bizonyítják, hogy a Közel-Keleten már 13 ezer évvel ezelőtt különféle tej- és gabonaféléket erjesztettek (Liu et al., 2018). Babilonban és az ókori Egyiptomban a fermentált italok, például a bor és a sör, valamint a kenyér alapvető élelmiszereknek számítottak (El-Gendy, 1983). Kínában mintegy 9 ezer évvel ezelőtt ismert volt a fermentált gyümölcs-, rizs- és mézalapú keverékek gyógyászati felhasználása (McGovern et al., 2004). A Kaukázus térségében elsősorban a fermentált tejtermékek, például a joghurt és a kefir terjedtek el (Vuppala et al., 2015).

A világ számos pontján egyedi fermentált élelmiszerek alakultak ki. Kelet-Ázsiában a szójaszós, a Koreában népszerű kimchi (erjesztett kínai kel) és Japánban a natto (*Bacillus subtilis* var. *natto* baktériummal fermentált szójabab) váltak meghatározóvá. Európában, hasonlóan a Kaukázushoz, a fermentált tejtermékek, különösen a joghurt terjedtek el leginkább (Wang és Fung, 1996; Tamang et al., 2020).

A kezdeti időkben a fermentációt a spontán előforduló mikrobák és a környezeti körülmények alakították, lehetővé téve, hogy az egyes földrajzi régiók autochton mikrobiótája meghatározó szerepet játsszon. Ez különböző országokban és térségekben egyedi, helyspecifikus fermentációs jellemzők kialakulásához vezetett (Mannaa et al., 2021).

A fermentált élelmiszerek és italok csoportosítása leginkább a felhasznált szubsztrátok alapján történik. A leggyakoribb alapanyagok közé tartozik a tej, a gabonafélék, a hüvelyesek, a zöldségek, a gyümölcsök, a húsok, a halak, valamint egyes gyógynövények (Rezac et al., 2018; Xiang et al., 2019). A fermentáció során a mikroorganizmusok különféle kombinációi változatos végtermékeket hoznak létre, amelyek eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek. Ez magyarázza, hogy világszerte rendkívül nagyszámú fermentált élelmiszert állítanak elő (Das és Deka, 2012; Mannaa et al., 2021).

2. A FERMENTÁCIÓ FOLYAMATA ÉS ELŐNYEI

A fermentálás története során számos alapanyag esett át ezen az eljáráson, beleértve a húst, halat, tejet, zöldségeket, szójababot, hüvelyeseket, gabonaféléket és gyümölcsöket is (Dimidi et al., 2019). A fermentáció térnyerése nem véletlen, hiszen két alapvető tényező tette népszerűvé már a kezdetektől. Az egyik, hogy javítja a késztermék érzékszervi tulajdonságait, ezáltal finomabb ízt és könnyebb emészthetőséget biztosít. A másik fontos szempont pedig az, hogy megnöveli az eltarthatósági időt. Ez utóbbi különösen fontos a romlandó élelmiszerek esetében (Jeyaram et al., 2009). Ezek a hozzáadott értékek garantálták a fermentáció széleskörű elterjedését, amely idővel ipari méreteket öltött.

A fermentáció további előnyei között szerepel, hogy csökkenti a káros komponensek mennyiségét az alapanyagokban. Erre példa a szójabab antinutritív anyagainak inaktiválása, például a tripszin inhibitorok lebomlása, valamint a tanninok, polifenolok és fitátok csökkentése (Sharma és Kapoor, 1996). Emellett a fermentáció fokozza bizonyos élelmiszerek és takarmányok tápértékét, mivel a mikroorganizmusok bontják a makrotápanyagokat. Kutatások igazolták, hogy a fermentált élelmiszerek nagyobb antioxidáns-tartalommal rendelkeznek, mint az alapanyagok (Melini et al., 2019; Sharma et al., 2020). Továbbá egyes vitaminok – például B₂ (riboflavin), B₉ (folsav), B₁₂ (kobalamin), K₁ és K₂ (fillokinon és menakinon) – mennyisége is növekedhet a fermentáció hatására (Şanlıer et al., 2019).



A fermentáció természetes, ugyanakkor kiemelkedően értékes biológiai folyamat. Jelentőségét napjainkban tovább növeli, hogy egyre több kutatás támasztja alá a humán bélmikrobiom és a különböző betegségek kialakulása közötti összefüggéseket. Ezek a vizsgálatok még inkább előtérbe helyezik a fermentált élelmiszerek mikrobiomot támogató funkcióját (Mannaa et al., 2021). A fermentációs eljárások nemcsak az ételmiszeriparban, hanem az állati takarmányozásban is fontos szerepet töltenek be. A fermentált takarmányok támogatják az állatok emésztőrendszerének egészségét, hozzájárulva az emésztési folyamatok optimalizálásához és az általános egészségi állapot javításához. Ezek az előnyös tulajdonságok összhangban állnak az Európai Unió azon célkitűzésével, amely az antibiotikum-használat csökkentésére és a fenntartható állattartás előmozdítására irányul (Hatvan et al., 2024).

A fermentáció olyan folyamat, melynek során az abban résztvevő mikroorganizmusok – baktériumok vagy élesztőgombák – enzimei átalakítják az alapanyagok különböző összetevőit (Dimidi et al., 2019). Az enzimek katalizálják a szerves anyagok lebontását, amelynek eredményeként egyszerűbb tápanyagok és bioaktív vegyületek, például bakteriocinek keletkeznek (Campbell-Platt, 1994). A fermentáció során az egyik legfontosabb biokémiai reakció, hogy a mikroorganizmusok cukrokat és összetett szénhidrátokat alakítanak át szerves savakká (Vuppala et al., 2015).

A sikeres fermentáció kulcsa a megfelelő mikrobák kiválasztása és optimális környezeti feltételek biztosítása, amelyek támogatják azok elszaporodását és anyagcsere-tevékenységét. Ezért a fermentáció biológiai tartósítási eljárásnak is felfogható. A fermentált élelmiszerek és takarmányok fogyasztásának egészségügyi előnyei közé tartozik:

- a probiotikus hatás: a bélmikrobiótát támogató baktériumok elszaporodása,
- az antinutritív anyagok lebomlása,
- a szerves savak és egyéb hasznos metabolitok termelődése, továbbá
- a makrotápanyagok könnyebb emészthetősége.

Mindezek az előnyök együttesen hozzájárulnak az emésztési folyamatok javításához és a tápanyagok jobb hasznosulásához (Deák et al., 2006; Tibbetts et al., 2017). Egy tanulmányukban Balasubramanian et al. (2024) kiemelik a fermentáció során alkalmazott baktériumok jótékony tulajdonságaiból fakadó pozitív élettani hatásokat, különös tekintettel a bél-agy tengely működésére. E mechanizmusok hozzájárulnak az idegrendszer normál működéséhez és a mentális jóllét fenntartásához. A szerzők hangsúlyozzák, hogy a fermentált élelmiszerek kulcsszerepet játszanak a mikrobióta-alapú, mentális egészséget célzó terápiák új generációjában.

3. A FERMENTÁCIÓT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

A fermentációs folyamatot számos tényező befolyásolja, amelyek meghatározzák a végtermék minőségét és biztonságosságát. Ezek közé tartoznak a higiéniai szempontok is, hiszen a patogén mikroorganizmusok jelenléte veszélyeztetheti a fogyasztásra való alkalmasságot. E tényezők tudatos és összehangolt szabályozása kulcsfontosságú, hiszen az optimális körülmények biztosítása nélkül a fermentáció kiszámíthatatlanná válhat.

A fermentációs folyamat sikeressége nagymértékben függ a megfelelő mikroorganizmusok, vagy azok kombinációjának kiválasztásától. Az összetett anyagok lebontása különböző anyagcsere-utakon valósulhat meg, ezért kulcsfontosságú meghatározni, hogy mi a kívánt végtermék, és ennek megfelelően milyen mikrobákat alkalmazzunk. A fermentálások során leggyakrabban előforduló baktériumok közé tartoznak a tejsavbaktériumok (*Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc* és *Pediococcus* fajok), a bifidobaktériumok, az ecetsavbaktériumok (*Acetobacter* spp.) és a



propionsavbaktériumok (*Propionibacterium* spp.). A legelterjedtebbek a tejsavbaktériumok (LAB) melyek a gram-pozitív fermentatív baktériumok széles csoportját alkotják, nem spóráznak és nem mozgékonyak. A tejsavtermelés LAB segítségével a biofinomítással kapcsolatos kutatások fontos fókuszpontja volt (és napjainkban is az). A LAB-k magas savtoleranciájuk és széles optimális növekedési hőmérsékleti tartományuknak köszönhetően ipari felhasználásra alkalmasak (Tanaka és Kondo, 2015). Az élesztőgombák, különösen a *Saccharomyces* fajok, meghatározó szerepet töltenek be az alkoholos erjedésben (Feng et al., 2018). Ezenkívül a *Bacillus* nemzetség is kiemelendő, mivel ammónia és zsírsavak termelésében játszik szerepet (Marco et al., 2017).

A fermentáció egyik legfontosabb abiotikus szabályozó tényezője a hőmérséklet, amely meghatározza a mikroorganizmusok szaporodási sebességét és anyagcsere-aktivitását (Khan et al., 2018). A legtöbb tejsavbaktérium mezofil, vagy termofil jellegű. Előbbiek 25-30°C között szaporodnak optimálisan, és főként sajtok, fermentált zöldségek, ill. húsok előállításában használatosak. Ezzel szemben a termofilek 37-42°C-on szaporodnak leggyorsabban, és főként a joghurt-, valamint sajt készítésben van szerepük (Deák et al., 2006; Moonga et al., 2021). A hőmérséklet növekedésével a fermentáció időigénye csökken, azonban a túl nagy hőmérséklet gátolja a sejtszaporodást, és módosíthatja a sejtekben lévő vegyületek transzportfolyamatait. A kis hőmérséklet viszont csökkenti a fajlagos szaporodási sebességet, ami lassabb fermentációhoz vezet (Auesukaree, 2017).

A fermentáció hőmérséklete mellett annak időtartama is befolyásolja a végtermék összetételét és minőségét. Túl rövid fermentáció alatt nem alakulnak ki a kívánt íz-, aroma- és textúrajellemzők, míg a túl hosszú fermentáció nemkívánatos melléktermékek képződését eredményezheti, amelyek rontják a minőséget.

A fermentáció során az optimális kémhatás biztosítása is elengedhetetlen, mivel az befolyásolja a mikroorganizmusok aktivitását és stabilitását. Az anaerob körülmények között lezajló fermentáció eredményeként tejsav keletkezik, amely csökkenti a pH-t (általában 4,5-es érték alá). A tejsavbaktériumok jól tűrik a kis pH-értékeket, míg a patogén baktériumok többsége nem képes túlélni ilyen savas környezetben. A savas kémhatás mikrobagátló hatása annak köszönhető, hogy denaturálja az enzimeket és a sejtfunkciókat szabályozó fehérjéket, ezáltal akadályozva a kórokozó baktériumok szaporodását. Ezen kívül a fermentáció során képződő egyéb gyenge savak (pl. ecetsav, propionsav) disszociálatlan állapotban toxikus hatást fejthetnek ki a káros mikroorganizmusokra (Szekér, 2007; Ásványi-Molnár, 2009).

A kémhatás szabályozásában szerepet játszik a pufferkapacitás, amely az adott közeg ellenállását jelenti a pH-változásokkal szemben. Különböző alapanyagok eltérő pufferkapacitással rendelkeznek, amelyet figyelembe kell venni a fermentációs folyamat tervezésekor (Bujňák et al., 2011).

A fermentáció oxigénigénye attól függ, hogy a folyamat anaerob vagy aerob körülmények között zajlik-e. A fermentor levegőztetése hozzájárul az optimális oxigénszint fenntartásához, illetve segíti a nem kívánt gázok eltávolítását (Mengesha et al., 2022). Az ecetsavat termelő baktériumok (pl. az *Acetobacter* fajok) oxigént igényelnek az anyagcseréjükhöz. Hasonlóképpen, az élesztőgombák is aerob környezetben tevékenykednek optimálisan sejtömeg (pl. egysejtfehérje /SCP – single-cell protein/) termelésük során. Ellenben az anaerob mikroorganizmusok számára az oxigén jelenléte nem szükséges, ezért az oxigénellátás biztosítása esetükben nem releváns (Henriques et al., 2018). Az elmondottakon túl még a keverés játszik fontos szerepet a fermentáció során, mert biztosítja az inokulum és a szubsztrát egyenletes eloszlását a reaktorban, segíti a gázok (pl. az oxigén) beoldódását és fenntartja az egyenletes hőmérsékletet a fermentációs közegben. A keverőlapátok típusának megválasztása a bioreaktor méretétől és kialakításától függ. Nem megfelelő keverés esetén oxigénhiány és tápanyag-eloszlási problémák léphetnek fel, amelyek csökkenthetik a fermentáció hatékonyságát.



4. A FERMENTÁCIÓ TÍPUSAI

A fermentálás hagyományosan kétféle módon történhet. Az egyik lehetőség a spontán fermentáció, amely természetes úton megy végbe. Ebben az esetben a mikroorganizmusok eredendően jelen vannak az alapanyagokban vagy a környezetben, ahonnan a termékbe kerülhetnek. A kontrollálatlan fermentáció azonban hátrányos lehet, mivel negatívan befolyásolhatja a végtermék ízét (például ecetes mellékíz eredményezhet) és növelheti a biogén aminok koncentrációját, amelyek élelmiszer-biztonsági szempontból aggályosak (Alpár et al., 2021). Ezért a spontán fermentáció hatékonysága messze elmarad az irányított fermentációtól (Dimidi et al., 2019). Az említett hátrányos tényezőkön túl (kellemetlen íz és illat, biogén aminok) a termékek stabilitása is lecsökken. Emiatt napjainkban élelmiszerek gyártása során már nem alkalmazható ez a módszer, mert nem felel meg az iparágban felmerülő kritériumoknak (Jin et al., 2024).

A modern élelmiszer- és takarmányiparban a növekvő termékkereslet és az élelmiszer-biztonsági követelmények miatt a starterkultúrák használata vált elsődlegessé (Hansen, 2002). Ezáltal a fermentáció jobban kontrollálható és biztosítható, hogy kizárólag az előre meghatározott mikroorganizmusok vegyenek részt a folyamatban. Az úgynevezett DVS (direct vat set) kultúrák lehetővé teszik, hogy a mikroorganizmusokat közvetlenül az alapanyaghoz adják, legtöbbször fagyasztva szárított (líofilezett) formában (Szakály, 2001). Ez nagymértékben elősegíti a fermentációs folyamatok szabályozhatóságát és az ipari fermentációs protokollok kialakítását (Galimberti et al., 2021). A fermentált élelmiszerek előállításában résztvevő mikroorganizmusok, valamint az általuk megvalósított anyagcsere-útvonalak és a keletkező végtermékek alapján a fermentációs folyamatok tipizálhatók (1. táblázat).

1. táblázat: Az élelmiszer-fermentálás főbb típusai a résztvevő mikroorganizmusok jellemző anyagcsere-termékei alapján

Fermentáció típusa	Mikroorganizmusok	Fő anyagcsere-termékek
Lúgos (alkalikus)	<i>Bacillus</i> és <i>Staphylococcus</i> fajok	Aminosavak, peptidek és ammónia
Etanolos	Élesztőgombák	Etanol és szén-dioxid
Ecetsavas	<i>Acetobacter</i> fajok	Ecetsav
Tejsavas	Tejsavbaktériumok	Tejsav

Forrás: Manna et al., 2021

Lúgos (alkalikus) fermentáció során a fehérjék hidrolizálnak, vagyis aminosavakra és peptidekre bomlanak, miközben ammónia szabadul fel, amely megemeli a pH-értéket (pH 8-9). A lúgos környezet gátolja a romlást okozó baktériumokat, így az ilyen fermentációval készült termékek hosszabb eltarthatóságúak. A folyamatot olyan mikroorganizmusok végzik, mint a *Bacillus* spp. (például a Japánban népszerű, szója alapú, natto nevű élelmiszer előállításánál) és bizonyos *Staphylococcus* fajok, amelyek extracelluláris proteinázokat termelnek, segítve a fehérjék bontását (Wang és Fung, 1996).

Az alkoholos fermentáció során a cukrok etanollá és szén-dioxiddá alakulnak, az élesztők (elsősorban a *Saccharomyces cerevisiae*) anyagcseréje révén. Az etanolos erjedés alapvető szerepet játszik a sör-, bor- és szeszesital-gyártásban, valamint a kenyérfőzés során, ahol a felszabaduló szén-dioxid elősegíti a tészta térfogatának növekedését (Marco et al., 2017).

Az ecetsavas fermentáció során az *Acetobacter* fajok a szerves vegyületekből (pl. alkoholok, cukrok) ecetsavat állítanak elő. Ez a folyamat alapvető szerepet játszik például az ételecet gyártásában (De Roos és De Vuyst, 2018).



Tejsavas erjedésnél a tejsavbaktériumok a cukrokat anaerob körülmények között tejsavvá alakítják. Ez az eljárás kritikus jelentőségű az élelmiszer- és takarmányiparban, mivel növeli a termék eltarthatóságát, a savas kémhatás révén gátolja a kórokozó baktériumokat és hozzájárul a kívánt ízkarakter kialakulásához. A tejsavas fermentáció két típusba sorolható: A homofermentatív tejsavas erjedés esetén a glikolízis során keletkező piroszőlősav teljes mértékben tejsavvá redukálódik. A heterofermentatív tejsavas erjedés során pedig a tejsav mellett szén-dioxid, etanol, kis mennyiségben ecetsav és glicerín is keletkezik (Deák et al., 2006).

Megemlítendő továbbá a *Propionibacterium* fajok által előidézett propionsavas erjedés, melynek során a tejsav sója (laktát) propionsavvá alakul és fontos szerepet játszik egyes sajtok, például az emmentáli sajt érlelésében, jellegzetes lyukazottságának kialakításában (Valentino et al., 2024). A kevertsavas fermentáció során pedig változatos végtermékek, például ecetsav, hangyasav, tejsav, borostyánkősav és etanol képződnek, miközben gázok (szén-dioxid és hidrogén) szabadulnak fel. Az *Enterobacteriaceae* család számos tagja vesz részt ez utóbbi folyamatban (Deák et al., 2006).

5. FERMENTÁLÁSI MÓDSZEREK

A fermentálás technikai kivitelezésére többféle módszer létezik, amelyek különböző tudományos (kutatási) és gyakorlati (ipari) célokat szolgálnak. Az alkalmazott fermentációs technológia befolyásolja a termelékenységet, a folyamat szabályozhatóságát és a végtermék minőségét.

A szakaszos (batch) fermentáció zárt rendszerben zajló folyamat, melynek során a mikrobákat a fermentáció elején meghatározott mennyiségű szubsztrát és tápanyagforrás mellé adagolják. A fermentálás alatt nem történik további betáplálás vagy végtermék-eltávolítás, a folyamat végén pedig a teljes fermentumot egyszerre távolítják el. Ez a módszer különösen kutatási célokra előnyös, mivel lehetőséget biztosít a mikroorganizmusok viselkedésének, a szubsztrát átalakulásának, a termékhozamnak és az oxigénigénynek a megfigyelésére. Ezen kívül optimalizációs kísérletekhez is alkalmazható, hiszen a hőmérséklet, a pH és egyéb beállítások módosításával meghatározhatók az ideális működési feltételek. Hátránya viszont, hogy kis termelékenységgű, mert a folyamat mindig újraindul, ami idővesztést jelent. Emellett a bioreaktorok minden egyes ciklust követő tisztítása és sterilizése időigényes és költséges (Rahman, 2013; Bolmanis et al., 2023).

Ezzel ellentétben, folytonos (continuous) fermentáció során a szubsztrát adagolása folyamatosan történik, miközben a végtermékből azonos mennyiséget távolítanak el. Ezáltal a rendszerben állandósult állapot alakul ki, ahol a be- és kiáramlás térfogata egyenlő, de ellentétes irányú. A módszer fő előnye, hogy nagyobb termelékenységet biztosít, mert a fermentáció megszakítás nélkül zajlik. Ugyanakkor hátránya, hogy nagyobb a befertőződés kockázata, mivel a rendszer folyamatosan nyitott állapotban van, így a környezetből könnyebben bekerülhetnek szennyeződések (Li et al., 2014). A szakaszos és a folytonos fermentáció közötti legnagyobb különbség, hogy míg előbbinél a szubsztrátot egyszer adagolják, addig utóbbinál a szubsztrát részletekben kerül a rendszerbe, az eltávolított végtermék arányában.

A rátáplálásos (fed-batch) fermentáció a szakaszos és a folytonos változat kombinációja. Ebben az eljárásban a tápoldat vagy a szubsztrát fokozatosan adagolható a fermentáció során, a végtermék eltávolítása viszont csak a folyamat végén történik, hasonlóan a szakaszos fermentációhoz. Ez a módszer széles körben alkalmazott, mert lehetővé teszi a mikroorganizmusok optimális tápanyag-ellátását, miközben csökkenti a szennyeződés kockázatát (Yamané és Shimizu, 1984). A rátáplálásos fermentáció kiemelten fontos az ipari biotechnológiában, mivel nagyobb termelékenységet biztosít, miközben a folyamat jól kontrollálható marad.



6. A FERMENTÁCIÓ IPARI ALKALMAZÁSAINAK FŐBB TERÜLETEI

A fermentáció ipari alkalmazása egyre szélesebb körű, elsősorban előnyös gazdasági és környezeti hatásai miatt. Az alábbiakban áttekintjük az ipari fermentáció legfontosabb területeit, különös tekintettel az élelmiszeriparra, a takarmányiparra, a gyógyszeriparra és a hulladékhasznosításra.

A fermentáció jelentős szerepet játszik a gyógyszeriparban, különösen az antibiotikumok, enzimek, aminosavak és más bioaktív vegyületek előállításában. 1929-ben Sir Alexander Fleming felfedezte a penicillint, amely megalapozta a mikroorganizmusok gyógyszeripari hasznosítását. Az ipari fermentációval előállított antibiotikumok azóta alapvető szerepet töltenek be az orvoslásban (Rahman, 2013). A fermentáció képes módosítani és felerősíteni a növényi hatóanyagokat is, ezzel növelve azok gyógyászati potenciálját (Luo et al., 2024). Ennek köszönhetően az ipari fermentáció egyaránt szorosan kapcsolódik a hagyományos és a modern orvosláshoz (Lu et al., 2020).

Az ipari fermentáció egyik legfontosabb terméke a bioetanol, amely fenntartható üzemanyag-alternatívaként szolgál. A bioetanol előállítása növényi alapanyagok fermentációjával, élesztőgombák segítségével történik. Ez a folyamat csökkenti a fosszilis energiahordozók használatából eredő környezeti terhelést (Waghmare et al., 2018). A bioetanol mellett a fermentáció hozzájárul a biodízel előállításához is. Például a *Trichosporon coremiiforme* élesztőgomba képes szennyvízből butanolos fermentációval biodízel-alapanyagot előállítani, amely költséghatékony és környezetbarát megoldás (Li et al., 2018). A biomassa fermentációja nemcsak üzemanyag, hanem biogáz előállítására is alkalmas. A biogáz-előállítás során a fermentációs közeg gyakran tartalmaz állattartásból származó trágyát, amely így hozzájárulhat az agráriumban keletkező hulladékok fenntartható újrahasznosításához (Liu és Liu, 2017).

A fermentáció az élelmiszeripar egyik kulcsfontosságú eljárása, mivel természetes módon, kémiai tartósítószer nélkül növeli az élelmiszerek eltarthatóságát (Giraffa, 2004), egyben javítja azok ízét, állagát, tápértékét és mikrobiológiai biztonságát (Laveffe et al., 2019). A fermentáció során különböző szerves savak (tejsav, ecetsav), etanol, hidrogén-peroxid és mikrobaellenes hatású peptidek képződnek, amelyek hozzájárulnak az élelmiszerek stabilitásához és biztonságához (McFeeters, 2004). A fermentált élelmiszerek fontos összetevői a tejsavbaktériumok, amelyek biztosítják a kívánt érzékszervi és mikrobiológiai tulajdonságokat (Voidarou et al., 2021). Emellett a fermentáció során bakteriocinek (pl. nizin, pediocin, plantaricin) is keletkeznek, amelyek immunmoduláló és antimikrobiális hatással bírnak, így hozzájárulhatnak az emberi egészség megőrzéséhez (Tamang et al., 2016). A modern technológiai módszerek, mint például a real-time PCR, a gélelektroforézis és a 16S rDNS szekvenálás lehetővé teszik a baktériumtörzsek pontos azonosítását és optimalizálását. Ezáltal biztosítható az élelmiszeripari fermentációs folyamatok hatékonysága, valamint biztonsága (Moraes et al., 2013; Hussain, 2018; El Sheikha és Hu, 2020).

A fermentáció a takarmány-előállításban is egyre fontosabb szerepet tölt be. A fermentált takarmányok javítják az állatok tápanyag-felvételét, csökkentik az antinutritív anyagok mennyiségét és növelik az emészthetőséget (Xu et al., 2012). Kérődző állatok etetésére már régóta alkalmaznak fermentált tömegtakarmányokat, ugyanis a tejsavas erjesztett kukorica, lucerna és fűfélék kiváló emészthetőségi tulajdonságokkal rendelkeznek. A sikeres fermentációhoz megfelelő növényt, mikroorganizmusokat és betakarítási technológiát kell alkalmazni. Napjainkban egyre nagyobb szerepet kapnak a mezőgazdasági melléktermékek (pl. búzakorpa, DDGS), amelyek könnyen beépíthetők a keveréktakarmányokba, így költséghatékony megoldást nyújtanak a takarmányipari fermentációhoz (de Castro et al., 2015; Daâssi et al., 2016; Liu et al., 2016). Emellett az élelmiszeripari melléktermékek, például a tejsavó, CGF (Corn Gluten Feed), melasz, répaszelet és



olajpogácsa is kiválóan alkalmazhatók fermentációs szubsztrátként. A tejsavó például laktóz-, fehérje-, lipid-, ásványianyag- és vitaminforrás, amelyet számos fermentációs eljárás során felhasználnak (Schingoethe, 1976; Ásványi et al., 2006).

7. IPARI FERMENTÁCIÓS ELJÁRÁSOK

A szilárd fázisú (solid-state fermentation, SSF) és a folyékony fázisú fermentáció (liquid-state fermentation, LSF) új lehetőségeket teremtett az élelmiszeripari melléktermékek takarmányokban való hasznosítására. Az elmúlt két évtizedben ezek az eljárások nemcsak kutatási szempontból váltak kiemelkedővé, hanem egyre nagyobb gyakorlati jelentőséget is kaptak. A berendezések és a technológiák gyors fejlődésének köszönhetően e módszerek egyre szélesebb körben elterjedtek (Subramaniyam és Vimala, 2012). A fermentáció során keletkező szerves savak és egyéb anyagcsere-termékek révén a takarmányban lévő, romlást vagy fertőzést okozó patogén mikroorganizmusok hatékonyan gátolhatók, ami egyben növeli az eltarthatóságot is (Alpár et al., 2021).

A fermentált takarmányok elterjedését az Európai Unió vonatkozó szabályozásai is ösztönözték, amelyek célja az antibiotikumok hozamfokozóként való alkalmazásának csökkentése. Ennek eredményeként a fermentált és probiotikus takarmányok ígéretes alternatívát kínálhatnak. Az Európai Tanács ajánlást tett innovatív takarmány-adalékanyagok fejlesztésének és használatának előmozdítására (Council of the European Union, 2023).

A szilárd fázisú fermentáció során a szubsztrátok – például növényi alapanyagok és élelmiszeripari melléktermékek – feldolgozása víz hozzáadása nélkül zajlik (Couto és Sanromán, 2006; Hashemi et al., 2011). A szilárd mátrix egyszerre szolgál tápanyagforrásként és mikrobiális tenyészfelületként, amely bizonyos mennyiségű szabad víztartalommal rendelkezik (Singhania et al., 2009). A fermentációs folyamatokban elsősorban gombák (pl. *Aspergillus*, *Fusarium*, *Monilia*, *Mucor* és *Rhizopus* fajok) vesznek részt, de baktériumok (pl. *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptococcus* és *Lactobacillus* fajok) is alkalmazhatók (Soccol et al., 2017). A mikroorganizmusok enzimeket termelve fokozatosan bontják le a szubsztrátokat, amelyek révén értékes vegyületeket állítanak elő (Hashemi et al., 2010; Martins et al., 2011). Az SSF egyik nagy előnye a költséghatékonysága, amely lehetővé teszi melléktermékek és hulladékok fenntartható hasznosítását. Az eljárás révén a szilárd szerves hulladékok biotermékekké, például felületaktív anyagokká vagy bioetanollá alakíthatók, így a takarmányiparon túlmenően is jelentős szereppel bír (Nasrabadi és Razavi, 2010; Yazid et al., 2017). A módszer további előnyeit és hátrányait a 2. táblázat foglalja össze.



2. táblázat: A szilárd fázisú fermentálás előnyei és hátrányai

Szilárd fázisú fermentálás	
Előnyök	Hátrányok
Egyszerű felépítésű bioreaktorok és tenyésztőrendszerek	A kis nedvességtartalom limitálja a felhasználható mikrobák körét
Csekély beruházási és üzemeltetési költségek	A befertőződés kockázata jelentős
Nagy biomassa-, ill. termékhozam	A fermentációs paraméterek (pl. hőmérséklet, kémhatás) kevésbé szabályozhatók
A kis nedvességtartalom gátolja a patogén mikrobák szaporodását	A termékek kinyerése és tisztítása bonyolult
Kis hulladéktermelés és elenyésző károsanyag-kibocsátás	Nehézkes a léptéknövelés
Természetes környezetet biztosít a beoltott mikroorganizmusok számára	A szubsztrátok előkezelése többletköltséggel jár
Nagy termékstabilitás	A keverés hiánya miatt nehéz megvalósítani a szubsztrát és a mikrobatenyészet kellő homogenitását
Kis vízigény	Hosszabb fermentációs idő a gombaspórák csírázási igénye miatt

Forrás: Katu et al., 2025

Folyékony fázisú fermentáció során a szubsztrátokat oldott formában, folyadékban lebegve dolgozzák fel, így a bioaktív vegyületek a fermentáléba oldódnak ki. Az LSF előnye, hogy a szubsztrátokat gyorsan felhasználja a rendszer és pontosan szabályozható fermentációs paramétereket biztosít (Subramaniam és Vimala, 2012). A módszer különösen alkalmas olyan baktériumok alkalmazására, amelyek nagy vízaktivitású környezetben képesek hatékonyan szaporodni. Az LSF leginkább másodlagos anyagcseretermékek előállítására szolgál, amelyek folyékony formában könnyen felhasználhatók. A számos biotechnológiai cég által alkalmazott eljárás előnyeit és hátrányait a 3. táblázat összegzi.

Sun et al. (2024) szerint az LSF technológiával előállított fermentált takarmányok kulcsszerepet játszanak majd az iparág jövőjében. Ezt erősíti Chen et al. (2025) kutatása is, amely a bakteriális és enzimes folyamatok szinergiáját hangsúlyozza. Megállapításuk szerint a paraméterek optimalizálásával az eljárás még szélesebb körben terjedhet el. Előrejelzésük szerint a hagyományostól eltérő fermentált fehérjetakarmányok – például lenmag-, gyapotmag- és földimogyoró-alapú termékek – stratégiai szerepet kapnak, különösen az antibiotikum-használat visszaszorításában és a szójaimport-függőség csökkentésében.



3. táblázat: A folyékony fázisú fermentálás előnyei és hátrányai

Folyékony fázisú fermentálás	
Előnyök	Hátrányok
Könnyen adaptálható az ipari méretű termeléshez	A magas technológiai színvonalú bioreaktorok és tenyésztőrendszerek beruházási költségigénye nagy
A fermentációs paraméterek (pl. hőmérséklet, kémhatás) pontosan szabályozhatók	Jelentős üzemeltetési költségek
A termékek kinyerése egyszerű	A nagy nedvességtartalom elősegíti a patogén mikrobák elszaporodását
Keveréssel biztosítható a szubsztrát és a mikrobatenyészet megfelelő homogenitása	A folyékony fermentált takarmányok etetése gyakorlati nehézségekkel jár
A fermentáció során keletkező szerves savak gátolják a kórokozó mikrobák szaporodását	A termékek stabilitása és eltarthatósága erősen korlátozott
Lehetővé teszi a mikroorganizmusok széles körének alkalmazását	A folyékony termékek tárolása problematikus

Forrás: Katu et al., 2025

8. FOLYÉKONY FÁZISÚ FERMENTÁCIVAL ELŐÁLLÍTOTT TAKARMÁNYOK JÓTÉKONY HATÁSAI

A 2000-es évek eleje óta egyre több hazai és nemzetközi kutatás foglalkozik a fermentált takarmányok sertéstakarmányozásban betöltött szerepével és előnyeivel. Brooks (2008) állítása szerint az LSF technológiával előállított takarmányok jótékony hatást gyakorolnak az állatok bélrendszerére, valamint javítják a tápanyagok hasznosulását. Fontos azonban kiemelni, hogy a megfelelő hatásfok csak irányított fermentációval érhető el. A tejsavbaktériumok konzerváló és probiotikus tulajdonságai egyaránt érvényesülnek, emellett az LSF hatékony eszköz lehet az antinutritív anyagok és a mikotoxinok koncentrációjának csökkentésére is. Eredményessége miatt ez a technológia egyre népszerűbb, mivel javítja a sertések teljesítményét és csökkenti a takarmányozás környezetterhelését.

Jha és Berrocoso (2016) kutatása kiemeli a fermentált élelmi rostok és fehérjék kedvező hatásait a sertések bélrendszerére és a környezetre. Eredményeik szerint a fermentált rostokkal etetett állatok bélmikrobiótája nagyobb mennyiségű nitrogént képes visszatartani, amely hozzájárul a baktériumok fehérjetömegének növekedéséhez. Ez javítja annak esélyét, hogy a bélrendszerben olyan baktériumok telepedjenek meg és szaporodjanak el, amelyek pozitív élettani hatást fejtenek ki.

Missotten et al. (2010) rámutattak, hogy az antibiotikumok növekedés-serkentőként való alkalmazásának 2006. évi betiltását követően az LSF-módszerre egyre nagyobb figyelem irányult. Egyik legfőbb előnye, hogy a takarmány és a víz egyidejű jelenlétét biztosítja, ami megkönnyíti a választott malacok számára a kocatejről a szilárd takarmányra való átállást. Emellett a savas kémhatású fermentált takarmány támogatja a gyomor védekezőképességét a kórokozókkal szemben. Chen et al. (2023) megfigyelték, hogy bamei sertések fermentált takarmányozása során a gyulladásos citokinek mennyisége csökkent, ami az immunválasz erősödésére utalt. A takarmány kukoricából, búzakorpából, szójadarából és lucernaszilázsából állt, amelyet *Lactiplantibacillus plantarum* és *Bacillus subtilis* baktériumokkal oltottak be. Xu et al. (2020) meta-analízise szerint a fermentált takarmányok – jobb emészthetőségüknek köszönhetően – növelik a hízósertések napi súlygyarapodását. Alpár et al. (2021) is megerősítik, hogy fermentációval gátolhatók a káros



mikroorganizmusok, ami nemcsak az állatok egészségének megőrzését segíti elő, hanem növeli a takarmány eltarthatóságát is. Kutatásaik szerint az LSF takarmányok csökkenthetik a *Salmonella* és kóliiform fajok által okozott hasmenéses megbetegedések előfordulását, emellett immunmodulátorként is szerepet játszhatnak. Hasonló eredményekről számoltak be Zhang et al. (2024): a búzaalapú fermentált takarmányokkal etetett növendékmalacok jobb növekedési mutatókat produkáltak, miközben a bélrendszerükben nőtt a jótékony baktériumok száma, míg a káros *Escherichia coli* szintje csökkent.

Niba et al. (2009) szerint az LSF takarmányok etetése csökkenti a klórtetraciklin-rezisztens *Escherichia coli* jelenlétét a választott malacok bélrendszerében. Ezen kívül csirkék esetében a fermentált takarmányok szerves sav tartalma javítja a bél gát funkcióját a patogén baktériumokkal szemben, mert a savas kémhatás kedvezőtlen környezetet teremt a kórokozók számára. A fermentált takarmányok tejsavbaktérium-számának el kell érnie a 10^9 tke/ml (telepképző egység/ml) nagyságrendet annak érdekében, hogy a kívánt élettani hatásokat ki tudják fejteni.

Heres (2004) kutatási eredményeinek tanúsága szerint a fermentált takarmányok jelentősen csökkentik a brojlerek *Salmonella*- és *Campylobacter*-fertőzöttségét a standard csirketáppal takarmányozott állatokhoz képest. A pozitív hatás itt is a fermentáció során keletkező szerves savak jelenlétére vezethető vissza, amelyek hozzájárulnak a bél mikrobióta stabilizálásához. Naji et al. (2015) és Jazi et al. (2017) kutatásai szintén alátámasztották az LSF takarmányok etetésének előnyeit. Az előbbi kutatócsoport megállapította, hogy a fermentált takarmányok javítják a brojlerek bélrendszerének baktérium-összetételét és csökkentik az *Enterobacteriaceae* család tagjainak jelenlétét a gyomor–bél traktusban. Jazi et al. (2017) hasonló megfigyeléseket tettek a fermentált gyapotmagliszt brojlercsirkék takarmányozásában történő alkalmazása során.

Lee et al. (2023) takarmány-koncentrátumot (kukoricapehely, búzakorpa, kukorica-glutén takarmány, búza, szójadara, pámaliszt, szójahéj, csillagfürtpehely, takarmánymész, só, nátrium-bikarbonát és vitamin komplex) fermentáltak, majd ennek húsmarhákra gyakorolt hatását vizsgálták. A fermentáció során megnőtt az alkalmazott mikroorganizmusok (*Bacillus subtilis*, *Enterococcus faecium*, *Saccharomyces cerevisiae*) száma, amely nagyobb szerves sav-tartalmat és kisebb pH-értéket eredményezett. Ennek hatására javult a bendőben zajló emésztési folyamatok hatékonysága, azonban a fermentált takarmány nem befolyásolta jelentősen az állatok súlygyarapodását. A fermentált koncentrátum elősegíti a hasznos mikroorganizmusok elszaporodását a bendőben, amely kedvező hatást gyakorolhat az állatok egészségére és a takarmány emészthetőségére. Guan és munkatársainak (2023) vizsgálatai megerősítették, hogy bizonyos baktériumokkal – különösen a *Lactiplantibacillus plantarum* és a *Limosilactobacillus salivarius* tejsavbaktérium-fajok törzseivel – csökkenteni lehet a fermentált takarmányok mikrobiális és mikotoxin (pl. DON és aflatoxin) eredetű szennyeződéseit. A szerzők hangsúlyozzák, hogy ezeknek a hatásoknak és a mikotoxinokkal kapcsolatos lebontási mechanizmusoknak a részletesebb feltárása további kutatásokat igényel. Ez nemcsak az állategészségügy szempontjából kiemelten fontos, hanem humánélettani vonatkozásban is jelentőséggel bírhat, alapot teremtve jövőbeli tudományos vizsgálatokhoz.

9. KÖVETKEZTETÉSEK

Megállapítható, hogy az SSF és az LSF módszer alkalmazása egyaránt jelentős előnyökkel járhat, a felhasználási célok és körülmények függvényében. Az SSF különösen hasznos megoldás nehezen oldódó vagy kis nedvességtartalmú alapanyagok esetén. Elsősorban enzimek előállítására, illetve



mezőgazdasági melléktermékek hatékony hasznosítására alkalmas. Ezzel szemben az LSF előnyösebb választás lehet fermentált takarmányok ipari méretű előállításánál, mivel ez a módszer könnyebben szabályozható és nagy volumenben is kivitelezhető. Mindazonáltal az LSF soktényezős, összetett folyamat, amelynek hatékonysága leginkább az alkalmazott mikroorganizmusoktól és a fermentáció körülményeitől függ. A fermentált takarmányok számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek, többek között javítják az állatok bélmikrobiom-összetételét, fokozzák a tápanyagok hasznosulását, csökkentik a kórokozó mikroorganizmusok számát és hozzájárulnak az állatok általános egészségi állapotának javításához. A gazdasági szempontokat figyelembe véve is jelentős innovációnak számítanak, hiszen az antibiotikumok használatának csökkentésével fenntarthatóbb állattartási rendszerek kialakítását teszik lehetővé. A modern fermentációs technológiák nemcsak a takarmányiparban, hanem az élelmiszer- és gyógyszeriparban is meghatározó szerepet játszanak. A biotechnológiai fejlesztések és a fenntarthatóság előtérbe helyezése tovább ösztönzi az új fermentációs technikák kutatását és ipari alkalmazását. Az automatizálás és a mesterséges intelligencia integrálása új lehetőségeket teremthet az ipari fermentáció optimalizálására. Az anyagcsere-mechanizmusok pontosabb megértése pedig hozzájárulhat az állati és emberi egészség megőrzéséhez, valamint a betegségek megelőzésének és kezelésének hatékonyabbá tételéhez.



Potential of Industrial Fermentation in Food and Swine Feed Production: A Literature Review

ZOLTÁN HATVAN¹, KATU JIM KIOKO¹, GEORGINA PINTÉR², LÁSZLÓ VARGA², BALÁZS ÁSVÁNYI^{2*}

¹Széchenyi István University, Wittman Antal Plant-, Animal- and Food Sciences

Multidisciplinary Doctoral School, Mosonmagyaróvár, Hungary

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3885-4904>

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-0722-9555>

²Albert Kázmér Faculty of Agricultural and Food Sciences of Széchenyi István University

Department of Food Science, Mosonmagyaróvár, Hungary

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-2724-3648>

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7431-852X>

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4066-6248>

Email: asvanyi.balazs@sze.hu

*Corresponding author/Levelező szerző

ABSTRACT

This review offers a comprehensive analysis of fermentation as a key biotechnological process in the production of food and feed. It presents the historical evolution and classification of fermentation, highlights the major microbial groups involved, and outlines the main influencing factors such as pH, temperature, oxygen levels, and nutrient availability. The article focuses on the most common applications in the food and feed industries, particularly emphasizing the benefits of using starter cultures and controlled fermentation conditions. A significant portion is dedicated to comparing solid-state fermentation (SSF) and liquid-state fermentation (LSF), discussing their industrial feasibility, economic advantages, and effectiveness in preserving product quality and safety. LSF emerges as a particularly promising method in livestock feeding, offering probiotic and antimicrobial effects, improving nutrient absorption, and reducing the need for antibiotics. The review summarizes findings from recent studies that confirm the benefits of fermented feeds in pigs and poultry, including improved gut health and growth performance. Furthermore, it discusses how fermentation technologies contribute to sustainability by utilizing agricultural by-products and waste materials. With the integration of automation, artificial intelligence, and genomic tools, industrial fermentation processes can be optimized for greater efficiency and a broader impact on sustainable agriculture and food systems.

Keywords: animal nutrition, food industry, solid-state fermentation, liquid-state fermentation

Köszönetnyilvánítás

A közlemény elkészítését a „Fertőző állatbetegségek, antimikrobiális rezisztencia, állatorvosi közegészségügy és élelmiszerlánc-biztonság nemzeti laboratóriuma” című, RRF-2.3.1-21-2022-00001 azonosító számú projekt támogatta.



IRODALOMJEGYZÉK

- Alpár, B., Tóth, T., Ásványi, B., Lakatos, E., Zsédely, E., Berczi, E., Molnár, J. & Varga, L. (2021). Fermentált takarmányok alkalmazási lehetőségei a monogasztrikus állatok takarmányozásában. *Agro Napló*, 25(5), 51-52.
- Ásványi, B., Reichart, O., Szigeti, J. & Varga, L. (2006). Screening and selection of *Kluyveromyces* strains for use in batch production of single-cell protein from cheese whey. *Milchwissenschaft*, 61(4), 378-381.
- Ásványi-Molnár, N. (2009). *Funkcionális hatású tejtermék előállítása spirulina (Arthrospira platensis) felhasználásával* [Doktori (PhD) értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem]. Mosonmagyaróvár.
- Auesukaree, C. (2017). Molecular mechanisms of the yeast adaptive response and tolerance to stresses encountered during ethanol fermentation. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 124(2), 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2017.03.009>
- Balasubramanian, R., Schneider, E., Gunnigle, E., Cotter, P. D., Cryan, J. F., (2024). Fermented foods: Harnessing their potential to modulate the microbiota-gut-brain axis for mental health. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 158, 105562. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2024.105562>
- Bolmanis, E., Dubencovs, K., Suleiko, A. & Vanags, J. (2023). Model predictive control – A stand out among competitors for fed-batch fermentation improvement. *Fermentation*, 9(3), 206. <https://doi.org/10.3390/fermentation9030206>
- Brooks, P. H. (2008). Fermented liquid feed for pigs. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 3, 073. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20083073>
- Bujňák, L., Maskalová, I. & Vajda, V. (2011). Determination of buffering capacity of selected fermented feedstuffs and the effect of dietary acid-base status on ruminal fluid pH. *Acta Veterinaria Brno*, 80(3), 269-273. <https://doi.org/10.2754/avb201180030269>
- Campbell-Platt, G. (1994). Fermented foods – A world perspective. *Food Research International*, 27(3), 253-257. [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(94\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0963-9969(94)90093-0)
- Chen, J., Wu, G. F., Pang, H. L., Hua, J. Y., Guan, Y. F., Zhang, M., Duan, Y. K., Qin, G. Y., Wang, L., Cai, Y. M., & Tan, Z. F. (2023). Effect of mixed *Lactiplantibacillus plantarum*- and *Bacillus subtilis*-fermented feed on growth, immunity, and intestinal health of weaner pigs. *Fermentation*, 9(12), 1005. <https://doi.org/10.3390/fermentation9121005>
- Chen, B. L., Liu, J. C., Liu, M. J., Zhang, H. L., Li, X. Y., Tian, C. C., & Chen, Y. (2025). Synergistic effect of microorganisms and enzymes on nutritional value of corn stover and wheat straw. *Fermentation*, 11(4), 210. <https://doi.org/10.3390/fermentation11040210>
- Council of the European Union (2023). Council recommendation on stepping up EU actions to combat antimicrobial resistance in a One Health approach. *Official Journal of the European Union*, C220, 1-20.
- Couto, S. R. & Sanromán, M. Á. (2006). Application of solid-state fermentation to food industry – A review. *Journal of Food Engineering*, 76(3), 291-302. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.022>
- Daâssi, D., Zouari-Mechichi, H., Frikha, F., Rodríguez-Couto, S., Nasri, M. & Mechichi, T. (2016). Sawdust waste as a low-cost support-substrate for laccases production and adsorbent for azo dyes decolorization. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 14, 1. <https://doi.org/10.1186/s40201-016-0244-0>



- Das, A. J. & Deka, S. C. (2012). Fermented foods and beverages of the North-East India. *International Food Research Journal*, 19(2), 377-392.
- de Castro, R. J. S., Ohara, A., Nishide, T. G., Bagagli, M. P., Dias, F. F. G. & Sato, H. H. (2015). A versatile system based on substrate formulation using agroindustrial wastes for protease production by *Aspergillus niger* under solid state fermentation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(4), 678-684. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2015.08.010>
- De Roos, J. & De Vuyst, L. (2018). Acetic acid bacteria in fermented foods and beverages. *Current Opinion in Biotechnology*, 49, 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.08.007>
- Deák, T., Kiskó, G., Maráz, A. & Mohácsiné Farkas, Cs. (2006). *Élelmiszer-mikrobiológia*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Dimidi, E., Cox, S. R., Rossi, M. & Whelan, K. (2019). Fermented foods: Definitions and characteristics, impact on the gut microbiota and effects on gastrointestinal health and disease. *Nutrients*, 11(8), 1806. <https://doi.org/10.3390/nu11081806>
- El Sheikha, A. F. & Hu, D. M. (2020). Molecular techniques reveal more secrets of fermented foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(1), 11-32. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1506906>
- El-Gendy, S. M. (1983). Fermented foods of Egypt and the Middle East. *Journal of Food Protection*, 46(4), 358-367. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-46.4.358>
- Feng, R., Chen, L. & Chen, K. P. (2018). Fermentation trip: Amazing microbes, amazing metabolisms. *Annals of Microbiology*, 68(11), 717-729. <https://doi.org/10.1007/s13213-018-1384-5>
- Galimberti, A., Bruno, A., Agostinetto, G., Casiraghi, M., Guzzetti, L. & Labra, M. (2021). Fermented food products in the era of globalization: Tradition meets biotechnology innovations. *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 36-41. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.10.006>
- Giraffa, G. (2004). Studying the dynamics of microbial populations during food fermentation. *FEMS Microbiology Reviews*, 28(2), 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2003.10.005>
- Guan, Y. F., Lv, H. X., Wu, G. F., Chen, J., Wang, M., Zhang, M., Pang, H. L., Duan, Y. K., Wang, L., & Tan, Z. F. (2023). Effects of lactic acid bacteria reducing the content of harmful fungi and mycotoxins on the quality of mixed fermented feed. *Toxins*, 15(3), 226. <https://doi.org/10.3390/toxins15030226>
- Hansen, E. B. (2002). Commercial bacterial starter cultures for fermented foods of the future. *International Journal of Food Microbiology*, 78(1-2), 119-131. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00238-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00238-6)
- Hashemi, M., Mousavi, S. M., Razavi, S. H. & Shojaosadati, S. A. (2011). Mathematical modeling of biomass and α -amylase production kinetics by *Bacillus* sp. in solid-state fermentation based on solid dry weight variation. *Biochemical Engineering Journal*, 53(2), 159-164. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.09.017>
- Hashemi, M., Razavi, S. H., Shojaosadati, S. A., Mousavi, S. M., Khajeh, K. & Safari, M. (2010). Development of a solid-state fermentation process for production of an alpha amylase with potentially interesting properties. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 110(3), 333-337. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2010.03.005>
- Hatvan, Z., Varga, L., Székelyhidi, R. & Ásványi, B. (2024). The fermentability of agricultural raw materials by probiotic bacterial strains. *BIO Web of Conferences*, 125, 03006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412503006>



- Henriques, T. M., Pereira, S. R., Serafim, L. S. & Xavier, A. M. R. B. (2018). Two-stage aeration fermentation strategy to improve bioethanol production by *Scheffersomyces stipitis*. *Fermentation*, 4(4), 97. <https://doi.org/10.3390/fermentation4040097>
- Heres, L. (2004). *Campylobacter* and *Salmonella* control in chickens and the role of fermented food. *Tijdschrift voor Diergeneeskunde*, 129(10), 332-335.
- Hussain, M. A. (2018). Molecular techniques for the identification of LAB in fermented cereal and meat products. In El Sheikha, A. F., Levin, R. E. & Xu, J. P. (Eds.), *Molecular Techniques in Food Biology: Safety, Biotechnology, Authenticity and Traceability* (pp. 261-283). John Wiley & Sons, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9781119374633.ch11>
- Jazi, V., Boldaji, F., Dastar, B., Hashemi, S. R. & Ashayerizadeh, A. (2017). Effects of fermented cottonseed meal on the growth performance, gastrointestinal microflora population and small intestinal morphology in broiler chickens. *British Poultry Science*, 58(4), 402-408. <https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1315051>
- Jeyaram, K., Singh, T. A., Romi, W., Devi, A. R., Singh, W. M., Dayanidhi, H., Singh, N. R. & Tamang, J. P. (2009). Traditional fermented foods of Manipur. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 8(1), 115-121.
- Jha, R. & Berrocoso, J. F. D. (2016). Dietary fiber and protein fermentation in the intestine of swine and their interactive effects on gut health and on the environment: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 212, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.12.002>
- Jin, R. T., Song, J., Liu, C., Lin, R., Liang, D., Aweya, J. J., Weng, W. Y., Zhu, L. J., Shang, J. Q., Yang, S. (2024). Synthetic microbial communities: Novel strategies to enhance the quality of traditional fermented foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(4), e13388. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13388>
- Katu, J. K., Tóth, T. & Varga, L. (2025). Enhancing the nutritional quality of low-grade poultry feed ingredients through fermentation: A review. *Agriculture*, 15(5), 476. <https://doi.org/10.3390/agriculture15050476>
- Khan, M. I., Shin, J. H. & Kim J. D. (2018). The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- Laveffe, L., Marasini, D. & Carbonero, F. (2019). Microbial ecology of fermented vegetables and non-alcoholic drinks and current knowledge on their impact on human health. *Advances in Food and Nutrition Research*, 87, 147-185. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2018.09.001>
- Lee, S., Ryu, C. H., Back, Y. C., Lee, S. D. & Kim, H. (2023). Effect of fermented concentrate on ruminal fermentation, ruminal and fecal microbiome, and growth performance of beef cattle. *Animals*, 13(23), 3622. <https://doi.org/10.3390/ani13233622>
- Li, T., Chen, X. B., Chen, J. C., Wu, Q. & Chen, G. Q. (2014). Open and continuous fermentation: Products, conditions and bioprocess economy. *Biotechnology Journal*, 9(12), 1503-1511. <https://doi.org/10.1002/biot.201400084>
- Li, X. M., Song, C. H., Xiong, L., Chen, X. F., Huang, C., Lin, X. Q., Chen, X. D. & Ma, L. L. (2018). Microbial conversion of wastewater from butanol fermentation to microbial oil and biomass by oleaginous yeasts. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(3), 1220-1226. <https://doi.org/10.1002/ep.12780>
- Liu, H. J., Chen, D. D., Zhang, R. F., Hang, X. N., Li, R. & Shen, Q. R. (2016). Amino acids hydrolyzed from animal carcasses are a good additive for the production of bio-organic fertilizer. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1290. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01290>



- Liu, E. H. & Liu, S. Y. (2017). Process optimization and study of biogas fermentation with a mixture of duck manure and straw. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 439-444. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.045>
- Liu, L., Wang, J. J., Rosenberg, D., Zhao, H., Lengyel, G. & Nadel, D. (2018). Fermented beverage and food storage in 13,000 y-old stone mortars at Raqefet Cave, Israel: Investigating Natufian ritual feasting. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 21, 783-793. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.08.008>
- Lu, C. C., Liu, M., Shang, W. R., Yuan, Y., Li, M. X., Deng, X. X., Li, H. J. & Yang, K. H. (2020). Knowledge mapping of *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels (Danggui) research: A scientometric study. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 294. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00294>
- Luo, X. X., Dong, M. S., Liu, J. T., Guo, N. F., Li, J., Shi, Y. & Yang, Y. F. (2024). Fermentation: Improvement of pharmacological effects and applications of botanical drugs. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1430238. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1430238>
- Mannaa, M., Han, G., Seo, Y. S. & Park, I. (2021). Evolution of food fermentation processes and the use of multi-omics in deciphering the roles of the microbiota. *Foods*, 10(11), 2861. <https://doi.org/10.3390/foods10112861>
- Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., Gänzle, M., Kort, R., Pasin, G., Pihlanto, A., Smid, E. J. & Hutkins, R. (2017). Health benefits of fermented foods: Microbiota and beyond. *Current Opinion in Biotechnology*, 44, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.010>
- Marsh, A. J., Hill, C., Ross, R. P. & Cotter, P. D. (2014). Fermented beverages with health-promoting potential: Past and future perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 38(2), 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.05.002>
- Martins, S., Mussatto, S. I., Martínez-Avila, G., Montañez-Saenz, J., Aguilar, C. N. & Teixeira, J. A. (2011). Bioactive phenolic compounds: Production and extraction by solid-state fermentation. A review. *Biotechnology Advances*, 29(3), 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.01.008>
- McFeeters, R. F. (2004). Fermentation microorganisms and flavor changes in fermented foods. *Journal of Food Science*, 69(1), FMS35-FMS37. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb17876.x>
- McGovern, P. E., Zhang, J. Z., Tang, J. G., Zhang, Z. Q., Hall, G. R., Moreau, R. A., Nuñez, A., Butrym, E. D., Richards, M. P., Wang, C. S., Cheng, G. S., Zhao, Z. J. & Wang, C. S. (2004). Fermented beverages of pre- and proto-historic China. *PNAS*, 101(51), 17593-17598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0407921102>
- Melini, F., Melini, V., Luziatelli, F., Ficca, A. G. & Ruzzi, M. (2019). Health-promoting components in fermented foods: An up-to-date systematic review. *Nutrients*, 11(5), 1189. <https://doi.org/10.3390/nu11051189>
- Mengesha, Y., Tebeje, A. & Tilahun, B. (2022). A review on factors influencing the fermentation process of teff (*Eragrostis teff*) and other cereal-based Ethiopian injera. *International Journal of Food Science*, 2022, 4419955. <https://doi.org/10.1155/2022/4419955>
- Missotten, J. A. M., Michiels, J., Ovin, A., De Smet, S. & Dierick, N. A. (2010). Fermented liquid feed for pigs. *Archives of Animal Nutrition*, 64(6), 437-466. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2010.512725>



- Moonga, H. B., Schoustra, S. E., Linnemann, A. R., van den Heuvel, J., Shindano, J. & Smid, E. J. (2021). Influence of fermentation temperature on microbial community composition and physicochemical properties of mabisi, a traditionally fermented milk. *LWT*, 136(Part 2), 110350. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110350>
- Moraes, P. M., Perin, L. M., Silva Jr., A., Nero, L. A. (2013). Comparison of phenotypic and molecular tests to identify lactic acid bacteria. *Brazilian Journal of Microbiology*, 44(1), 109-112. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822013000100015>
- Naji, S. A. H., Al-Gharawi, J. K. M. & Al-Zamili, I. F. B. (2015). The effect of starting age of feeding wetting fermented feed on the intestinal flora, humoral and cellular immunity of broiler chicks. *International Journal of Advanced Research*, 3(1), 41-49.
- Nasrabadi, M. R. N. & Razavi, S. H. (2010). High levels lycopene accumulation by *Dietzia natronolimnaea* HS-1 using lycopene cyclase inhibitors in a fed-batch process. *Food Science and Biotechnology*, 19(4), 899-906. <https://doi.org/10.1007/s10068-010-0127-6>
- Niba, A. T., Beal, J. D., Kudi, A. C. & Brooks, P. H. (2009). Potential of bacterial fermentation as a biosafe method of improving feeds for pigs and poultry. *African Journal of Biotechnology*, 8(9), 1758-1767.
- Rahman, M. (2013). Medical applications of fermentation technology. *Advanced Materials Research*, 810, 127-157. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.810.127>
- Rezac, S., Kok, C. R., Heermann, M. & Hutkins, R. W. (2018). Fermented foods as a dietary source of live organisms. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1785. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01785>
- Şanlıer, N., Gökçen, B. B. & Sezgin, A. C. (2019). Health benefits of fermented foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(3), 506-527. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1383355>
- Schingoethe, D. J. (1976). Whey utilization in animal feeding: A summary and evaluation. *Journal of Dairy Science*, 59(3), 556-570. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(76\)84240-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(76)84240-3)
- Sharma, R., Garg, P., Kumar, P., Bhatia, S. K. & Kulshrestha, S. (2020). Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods. *Fermentation*, 6(4), 106. <https://doi.org/10.3390/fermentation6040106>
- Sharma, A. & Kapoor, A. C. (1996). Levels of antinutritional factors in pearl millet as affected by processing treatments and various types of fermentation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 49(3), 241-252. <https://doi.org/10.1007/BF01093221>
- Singhania, R. R., Patel, A. K., Soccol, C. R. & Pandey, A. (2009). Recent advances in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 44(1), 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.019>
- Soccol, C. R., da Costa, E. S. F., Letti, L. A. J., Karp, S. G., Woiciechowski, A. L. & Vandenberghe, L. P. S. (2017). Recent developments and innovations in solid state fermentation. *Biotechnology Research and Innovation*, 1(1), 52-71. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2017.01.002>
- Subramaniam, R. & Vimala, R. (2012). Solid state and submerged fermentation for the production of bioactive substances: A comparative study. *International Journal of Science and Nature*, 3(3), 480-486.
- Sun, H. X., Kang, X. Y., Tan, H. Z., Cai, H. Y., Chen, D. (2023). Progress in fermented unconventional feed application in monogastric animal production in China. *Fermentation*, 9(11), 947. <https://doi.org/10.3390/fermentation9110947>
- Sun, H. X., Jiang, Z. P., Chen, Z. M., Liu, G. H., Liu, Z. X. (2024). Effects of fermented unconventional protein feed on pig production in China. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1446233. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1446233>



- Szakály, S. (2001). *Tejgazdaságtan*. Dinasztia Kiadó, Budapest.
- Szekér, K. (2007). *Tejsavbaktériumok és élelmiszer-eredetű romlás- és kórokozó baktériumok versengő kölcsönhatásának vizsgálata* [Doktori (PhD) értekezés, Budapesti Corvinus Egyetem]. Budapest.
- Tamang, J. P., Cotter, P. D., Endo, A., Han, N. S., Kort, R., Liu, S. Q., Mayo, B., Westerik, N. & Hutkins, R. (2020). Fermented foods in a global age: East meets West. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 184-217. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12520>
- Tamang, J. P., Shin, D. H., Jung S. J. & Chae, S. W. (2016). Functional properties of microorganisms in fermented foods. *Frontiers in Microbiology*, 7, 578. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00578>
- Tanaka, T. & Kondo, A. (2015). Cell surface engineering of industrial microorganisms for biorefining applications. *Biotechnology Advances* 33(7), 1407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.06.002>
- Tibbetts, S. M., Mann, J. & Dumas, A. (2017). Apparent digestibility of nutrients, energy, essential amino acids and fatty acids of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) diets containing whole-cell or cell-ruptured *Chlorella vulgaris* meals at five dietary inclusion levels. *Aquaculture*, 481, 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.08.018>
- Valentino, V., Magliulo, R., Farsi, D., Cotter, P. D., O'Sullivan, O., Ercolini, D. & De Filippis, F. (2024). Fermented foods, their microbiome and its potential in boosting human health. *Microbial Biotechnology*, 17(2), e14428. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14428>
- Voidarou, C., Antoniadou, M., Rozos, G., Tzora, A., Skoufos, I., Varzakas, T., Lagiou, A. & Bezirtzoglou, E. (2021). Fermentative foods: Microbiology, biochemistry, potential human health benefits and public health issues. *Foods*, 10(1), 69. <https://doi.org/10.3390/foods10010069>
- Vuppala, G., Krishna R. & Murthy K. (2015). Fermentation in food processing. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 4(1), 1-9.
- Waghmare, P. R., Khandare, R. V., Jeon, B. H. & Govindwar, S. P. (2018). Enzymatic hydrolysis of biologically pretreated sorghum husk for bioethanol production. *Biofuel Research Journal*, 5(3), 846-853. <https://doi.org/10.18331/BRJ2018.5.3.4>
- Wang, J. & Fung, D. Y. C. (1996). Alkaline-fermented foods: A review with emphasis on pidan fermentation. *Critical Reviews in Microbiology*, 22(2), 101-138. <https://doi.org/10.3109/10408419609106457>
- Xiang, H., Sun-Waterhouse, D. X., Waterhouse, G. I. N., Cui, C. & Ruan, Z. (2019). Fermentation-enabled wellness foods: A fresh perspective. *Food Science and Human Wellness*, 8(3), 203-243. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.08.003>
- Xu, B. C., Li, Z., Wang, C., Fu, J., Zhang, Y., Wang, Y. Z. & Lu, Z. Q. (2020). Effects of fermented feed supplementation on pig growth performance: A meta-analysis. *Animal Feed Science and Technology*, 259, 114315. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114315>
- Xu, F. Z., Zeng, X. G. & Ding, X. L. (2012). Effects of replacing soybean meal with fermented rapeseed meal on performance, serum biochemical variables and intestinal morphology of broilers. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 25(12), 1734-1741. <https://doi.org/10.5713/ajas.2012.12249>
- Yamanè, T., Shimizu, S. (1984). Fed-batch techniques in microbial processes. In *Bioprocess Parameter Control. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 30. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0006382>



- Yazid, N. A., Barrena, R., Komilis, D. & Sánchez, A. (2017). Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: A review. *Sustainability*, 9(2), 224. <https://doi.org/10.3390/su9020224>
- Zhang, A. R., Yang, Y. Y., Li, Y., Zheng, Y. F., Wang, H. M., Cui, H. X., Yin, W., Lv, M., Liang, Y. X., Chen, W. L. (2024). Effects of wheat-based fermented liquid feed on growth performance, nutrient digestibility, gut microbiota, intestinal morphology, and barrier function in grower-finisher pigs. *Journal of Animal Science*, 102, skae229. <https://doi.org/10.1093/jas/skae229>

©Copyright 2025 by the Authors.

The journal is Open Access (Platinum). This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

