

A sütőipari élesztő erjedési folyamata a tészta előállítás paramétereinek függvényében

Fermentation process of baker's yeast as a function of the technological parameters of dough preparation

dr. GOMBOS Sándor¹, dr. SZILÁGYI József²

^{1,2} Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Csíkszeredai Kar,
Élelmiszertudományi Tanszék, Csíkszereda, Szabadság tér 1.,
Tel.: 40-266-314-657, fax: 40-266-372-099, <http://www.sapientia.ro>
gombossandor@uni.sapientia.ro, szilagyihozsef@uni.sapientia.ro

ABSTRACT

Considering the necessity to increase the quality of products made from the fermented dough, it is possible to increase the selectivity of the fermentation process by lowering the temperature. However, this phenomenon changes the kinetics of yeast cell metabolism, speed of overall process decreases, and thus the duration of the whole fermentation period increases. Kinetic parameters can be determined individually, but also in more comprehensive steps, which allows for a rapid reassessment of the fermentation process under modified working conditions. To achieve this goal, a mathematical model is developed in the first step, which takes into account the change in the concentration of chemical species present in the reaction mass during the fermentation period. The obtained mathematical model offers later possibility of simulation, depending on the production of the initial dough, its components and the parameters of the fermentation stage.

Keywords: dough, fermentation, kinetics, parameters, composition

KIVONAT

Figyelembe véve a kelesztett tésztából előállított termékek jobb minőségének szükségességét, adott lehetőség van a fermentációs folyamat szelektivitásának növelésére a hőmérséklet csökkentésével. Ez a jelenség azonban megváltoztatja az élesztősejtek anyagcseréjének a kinetikáját, a folyamatok sebessége lecsökken, és így az egész kelesztési periódus időtartama megnövekszik. A kinetikai paraméterek meghatározása történhet egyénileg, azaz kisebb szakaszokban, de átfogóbb lépésekben is lehetséges, ami lehetőséget nyújt a fermentációs folyamat gyors újraértékelésére a módosított munkakörülmények között. Ennek a célnak az elérése érdekében az első lépésben kidolgozzuk a matematikai modellt, ami figyelembe veszi a reakció tömegben jelen lévő kémiai anyagok koncentrációjának változását az erjedési időtartam alatt. A javított matematikai modellel megjelenik a szimuláció későbbi lehetősége, a kezdeti tészta előállításának, alkotóelemeinek és a kelesztési szakasz paramétereinek függvényében.

Kulcsszavak: tészta, erjedés, kinetika, paraméterek, összetétel

1. BEVEZETÉS

A sütőipari termékek előállítása főleg az élesztővel kelesztett tésztákra alapozódik. A leggyakrabban használt élesztő a *Saccharomyces cerevisiae*, amely sörélesztő néven ismertebb. A gyártási receptek, az adagolási sorrend és a munkafeltételek a technológiai folyamatokban közvetlen és vagy közvetett hatásokat fejtenek ki az előállított termék minőségi jellemzőiben, valamint a termék táplálkozási és szenzoriális tulajdonságaiban. Ezek a tényezők utólag hatással vannak az gyártó egység gazdasági mutatóira is. Az alkalmazott sütőipari élesztő különböző minőségű és típusú lehet. A tésztába tett élesztőnek többféle hatása van: az élesztő sejtek szaporodása, az élesztő sejtek részvétele az anyagcsere folyamatokban, több anyagcsere termék előállítása, amelyek közül tészta térfogat szempontjából legfontosabb a széndioxid. A széndioxid elsődlegesen a tészta vizes fázisában jelenik oldott állapotban, majd amikor az adott vegyi összetétel és hőmérséklet

függvényében túllépi az oldhatósági határt, különböző méretű gázbuborékok keletkeznek, amelyek a tészta specifikus térfogatának a növekedését eredményezik. Az anyagcsere folyamatok, amelyben az élesztő sejtek részt vesznek nagyon komplexek. A folyamatok sebességét sok tényező befolyásolja, az anyagcsere folyamatok sebességének jelentős szerepe van a végtermék organoleptikus tulajdonságainak és aroma- és íz világának kialakulásában. Habár a technológiai folyamat műveleti lépései aránylag jól ismertek, mégis sok olyan tényező létezik, amelyek döntő módon képesek befolyásolni az élesztő sejtek anyagcseréjének a kinetikáját, ami a termék minőségének a változásait idézheti elő. Másrészt viszont a nyers- és segédanyagok minősége és technológiai tulajdonságai adott határok között változhatnak, és ez a tényező nehezen előrelátható módon befolyásolhatja a végtermék minőségét. Azért, hogy az erjesztés szempontjából végtermékek minősége állandóbb legyen, fontos az erjesztés kinetikájának pontosabb ismerete, így lehetővé válik az eredmény előreláthatósága megváltozott körülmények között is. Ugyanakkor, a kinetika tanulmányozása később ellenőrző eszközöket biztosít a fermentációs folyamat irányításához. Például, megjelenhet a kezdeti élesztő sejtek koncentrációjának csökkenése a tésztában, amit az élesztő tárolási hőmérséklet és páratartalom váltakozása okozhat, a kelesztési idő növekedését eredményezi. Az erjesztési művelet modellezése elősegíti az ismeretek szintjének növelését ezen a területen, de hozzájárulhat a fajlagos költségek csökkentéséhez, a termékek minőségének javításához és a kapcsolódó rendszerek jobb felhasználásához irányításuk révén. Emellett modellezés és szimuláció segítségével csökkenthető a gyártási hibák aránya, és elkerülhetők a nemkívánatos kísérletek ipari méretekben. A fermentációs folyamat szimulálása különféle számítási eszközökkel lehetséges, leggyakrabban az elektronikus számítógép segítségével.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A tészták erjedésével kapcsolatosan a tudományos szakirodalom meglepően kis számú publikációból, mindössze néhány könyvből és cikkből áll, annak ellenére, hogy a sörélesztő erjedése a tésztákban széles skálában alkalmazott művelet az élelmiszeriparban. Ez a helyzet megmagyarázható a fermentációs folyamat során bekövetkező fizikai, fizikai-kémiai, kémiai és biokémiai jelenségek különleges bonyolultságával, és ebből adódóan ezen átalakulások követésének nehézségeivel. A különféle típusú sütőipari élesztők felhasználása által okozott főbb különbségek differenciált erjesztési folyamatokban nyilvánulnak meg, különböző termékek előállításával, különféle arányokban, az erjesztett tészta jelentős különbségeket eredményez a kémiai és fizikai összetételben, ami később befolyásolja a termék érzékszervi tulajdonságait. A termékek fizikai tulajdonságai magukban foglalhatják a belső rész változatos tömörségét és a pékáruk változó vastagságú kéregét (Kulp, 2003).

A fermentációs folyamat differenciált hatékonysági mutatókkal jellemezhető, sok tényező befolyásolja az érintett mikroorganizmusok anyagcseréjét, ezek közül fontosabbak a *Saccharomyces cerevisiae* és a *Lactobacillus* fajok. A végbemenő transzformációs folyamatok mélyrehatóbb tisztázása érdekében szelektív módszert kell alkalmazni, amely a részt vevő fermentációs folyamatok egymást követő elemzését teszi lehetővé, első lépésként csak a *Saccharomyces cerevisiae*-t véve figyelembe. Az élesztősejtek olyan anyagcsere folyamatokba tartoznak, amelyeket számos tényező befolyásol, például a víz koncentrációja és fizikai-kémiai aktivitása, a keverékben található ásványi sók tartalma és koncentráció-eloszlása, a keverék pH-ja, a fehérjék és az aminosavak spektruma a keverékben, az erjedési folyamat során fennálló redox körülmények, a fermentáció eredményeként kialakult szén-dioxid koncentráció alakulása, valamint a keverék viszkozitása és hőmérséklete. Mivel a fermentációs folyamat során a kémiai fajok koncentrációk dinamikusan változnak, ezért a jelenséget egymást követő szakaszokban kell tanulmányozni, differenciálegyenletek rendszerének alkalmazásával. A legtöbb tudományos cikk csak bizonyos tényezők hatásainak vizsgálatára figyel, gyakorlatilag nincs olyan mélyreható tudományos vizsgálat, amely több olyan tényezőt is figyelembe venne, amelyek befolyásolják az élesztősejtek működését. Kísérleti vizsgálatok kimutatták, hogy az élesztősejtek metabolikus aktivitását jelentősen befolyásolják a keverék összetevőinek redox körülményei, amelyek különböző hatékonyságot eredményeznek, beleértve a szabad gyököket képező kémiai fajok kedvezőtlen hatását is (Smart, 2003). A sütőipari élesztő gyártásának technológiai paramétereinek múltja, ideértve az élesztő tárolását és a szállítási körülményeket is, jelentős hatást gyakorol az élesztősejtek teljesítményére, különös tekintettel azok alkalmazkodóképességére és inaktivációs együtthatójára. Például, a technológiai paraméterek nem megfelelően adaptált értékei a nedves élesztők szárítási fázisa alatt jelentősen csökkenthetik a száraz élesztők fajlagos aktivitását, ami szükségessé teszi, hogy ezeket nagyobb tömegarányban alkalmazzák. Nedves élesztők esetében a tárolási és szállítási körülményeknek, valamint a beszerzésük és felhasználásuk közötti időtartamnak sokkal jelentősebb hatása van, ugyanis ezáltal csökken a felhasználhatósági idejük (Abulhassan, 1981). Nagyon kevés tudományos cikk foglalkozik az élesztők fermentációs folyamatának kinetikai vizsgálatával a tésztafélékben, de még ezek sem képesek a mélyreható tanulmány alapját képezni, ehelyett nagyobb számú tanulmány létezik az etilalkohol képződésével járó fermentációs folyamatokról. Chaabane (2006) összehasonlítva vizsgálta a több szerző által korábban javasolt kinetikai modelleket, bemutatta az általuk javasolt matematikai modellek előnyeit és hátrányait, és röviden áttekintette a fermentációs folyamat során bekövetkező technológiai paraméterek, például a sók, a nitrogén és a széndioxid jelenlétének hatásait is. A szerző egymás után bemutatta fejlesztési szempontból kidolgozott matematikai modelleket, kezdve a viszonylag primitív modellektől a nagyobb bonyolultságú modellekig, ez

utóbbiak megpróbálták bevezetni a hőmérsékletet is a differenciálegyenletekbe (Chaabane, 2006). Ugyanez a szerző kiemeli a fermentációs folyamat különböző kinetikai modelljeiben mutatkozó eltéréseket, az érintett együtthatók eltérő értékeit, például az anyagcserét és a sejtnövekedést korlátozó tényezők szempontjából, de egyes esetekben a kinetikai paraméterek újra értékelésére szolgáló eltérő módszert is. A bemutatott kinetikai modellek egyik legfontosabb hiányossága a fermentációs folyamat sztöchiometriájának túlzott egyszerűsítése, amely jelentős hatással van a modellek minőségére, minden esetben figyelmen kívül hagyva számos kémiai vegyület jelenlétét vagy hiányát, amelyek széles körű hatással vannak a folyamatra. A tudományos szakirodalomban megjelent olyan cikk is, amely a munkahőmérsékletet, mint paramétert tartalmazza a kinetikai modell differenciálegyenleteiben, de a kidolgozott modell hőmérsékleti tartományának érvényessége korlátozott (Atala, 2001). Az alkoholos erjedés kinetikájának tanulmányozására összpontosító irodalom folyamatosan figyelmen kívül hagyja a fermentációs folyamat termofizikai tulajdonságainak változásait, például a keverék sűrűségének és hővezető képességének változásait, és nem veszi figyelembe a széndioxid jelenlétét vagy a tápanyagok kimerülést. A szakirodalom nem tartalmaz a fermentációs folyamatokra vonatkozó olyan tanulmányokat, amelyeket viszonylag alacsony hőmérsékleten (15-20 °C alatt) vagy dinamikus hőmérsékleti értékek jelenlétében végeznek.

3. TÉSZTA ERJEDÉSI KINETIKÁJÁNAK TÖKÉLETESÍTÉSE

A szakirodalom nagyon kevés adatot tartalmaz a sütőipari élesztő élesztés erjedési folyamatának kinetikájáról, az eljárás paramétereitől függően, gyakorlatilag csak megközelítő szempontokat mutat be, amelyek nem nyújtanak jelentős segítséget a matematikai modell kifejezésében. A tudományos kutatás több szakaszával megvalósítottuk a tökéletesítést, ezek közül néhány a laboratóriumi kísérletek területén, mások a numerikus számítások területén voltak. Az élesztő erjedési folyamatának tanulmányozása a bekövetkező átalakulások alaposabb tanulmányozását, a folyamat szimulálását jelenti adott munkakörülmények között, a munkaparaméterektől függően, amelyek lehetnek statikusak vagy dinamikusak. Például a hideg erjesztés, amelyet a tészta hőmérsékletének ellenőrzött növekedése követ az erjesztési művelet során, figyelembe veszi a hőmérsékletnek a fermentációs folyamat sebességére gyakorolt hatását. Mivel a sütőipari élesztő erjedési folyamata viszonylag összetett biokémiai folyamat, szükségessé válik e a folyamat egyenletének leírása sztöchiometrikus együtthatók bevonásával. A szakirodalomban sok megközelítés létezik, ezek többsége túlságosan egyszerűsített, ezért nem tud biztosítani később kellően pontos kinetikai egyenleteket, ezért csak formálisan írják le a folyamatok kinetikáját. Következésképpen észleltük az alaposabb megközelítés szükségességét, amely sokkal összetettebb és bonyolultabb. A sztöchiometrikus együtthatók értékének (szén, hidrogén, nitrogén stb.) egyensúlya alapján történő meghatározásához egy viszonylag összetett lineáris egyenletrendszer hozunk létre, amelyet egyszerű számításokkal nem lehet megoldani, és amelyek megoldására programok használata vált szükségessé elektronikus számítógépeken, például a Polymath, Sequalator, MathCAD vagy Wolfram Mathematica alkalmazásával. A kiszámított sztöchiometrikus együtthatók segítségével meg lehet határozni a tömeg- és hőmérlegeket. Így az előállítási eljárás során, amely különféle liszteket, élesztőfajtákat és/vagy -mennyiségeket, eltérő keverési és kelesztési hőmérsékleteket, különböző koncentrációjú nátrium-kloridot vagy más összetevőket vagy adalékokat használnak, a fermentációs folyamat lejátszódása kiszámíthatóvá válik, a becslés pontossága pedig érzékeny a figyelembe vett egyenletek számától és minőségétől függően. A fermentációs folyamat sebességének tanulmányozása több szempontból is elvégezhető, általában figyelembe véve a szubsztráttal (vagy szubsztrátokkal) szembeni reakciósebességet úgy, hogy a szubsztrát (vagy szubsztrátok) koncentrációjának csökkenését, a sejtekhez viszonyított reakciósebességet a növekedési sebesség értékével vetjük össze. Ami a fermentációs folyamatokat illeti, a tudományos irodalom számos kinetikai egyenletek halmazát tartalmazza, amelyeket különféle szerzők alkottak és javasoltak, rendszeresen közönséges differenciálegyenletek (ODE) rendszereiként, azonban ezeknek az egyenleteknek gyakran korlátozott pontosságuk van.

Egy tipikus kinetikai modell alapján (Groot, 1992) a teljes ODE rendszer a következő algoritmus állapotában javasolt:

$$\begin{aligned}
& t_i : S_i, X_i, P_i \\
& \frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_{SX} + S} \left(1 - \frac{P}{P_{\max}}\right)^m \\
& \frac{1}{X} \frac{dS}{dt} = q_S = q_{S\max} \left(1 - \frac{P}{P_{mS}}\right) \\
& \frac{1}{Y_{X/S}} = \frac{1}{Y_{X/S,m}} + \frac{m_{\text{aint},X}}{\mu} \\
& \frac{1}{X} \frac{dP}{dt} = v_P = q_S Y_{P/S} \\
& Y_{P/S} = 0,43(1 - 1,3Y_{X/S}) \\
& v_{rX} = \mu X \\
& v_{rS} = q_S X \\
& v_{rP} = v_P X \\
& S_{i+1} = S_i - \Delta S_i \\
& X_{i+1} = X_i + \Delta X_i \\
& P_{i+1} = P_i + \Delta P_i \\
& t_{i+1} : S_{i+1}, X_{i+1}, P_{i+1}
\end{aligned}$$

Ahol:

$t_i : S_i, X_i, P_i$ - a szubsztrát, a biomassa és az etilalkohol koncentrációja, g/l-ben kifejezve, a fermentációs időtartamhoz viszonyítva t_i ;

μ, μ_{\max} - növekedési sebesség és a sejtömeg maximális növekedési sebessége, h^{-1} ;

$q_S, q_{S\max}$ - a szubsztrátum fogyasztási sebessége, h^{-1} ;

v_P - az etilalkohol előállítás sebessége, h^{-1} ;

$m_{\text{aint},X}, m$ - kísérletileg meghatározott együtthatók;

$Y_{X/S}$ - a képződött sejtek tömege és a felhasznált szubsztrát tömege közötti arány, g/g;

$Y_{P/S}$ - a képződött etanol tömege és a felhasznált szubsztrát tömege közötti arány, g/g;

v_{rX} - reakciósebesség a sejtekhez viszonyítva, g/l·h;

v_{rS} - reakciósebesség a szubsztrátumhoz viszonyítva, g/l·h;

v_{rP} - reakció sebessége a termékhez viszonyítva, g/l·h ;

$t_{i+1} : S_{i+1}, X_{i+1}, P_{i+1}$ - a szubsztrát, a biomassa és az etilalkohol koncentrációja az új időtartamnál, t_{i+1} .

4. ÉRTÉKELÉS

Az alkoholos erjedés modellezésének különösen nehéz problémája az etilalkohol jelenlétének időbeli alakulásának értékelése, amely egyidejűleg befolyásolja a következőket: csökkenti a széndioxid oldhatóságát, módosítja a keverék fizikai-kémiai tulajdonságait, például a sűrűséget, viszkozitást, hőátadási együtthatót, hővezető képességet és a felületi feszültséget (Asada, 2012). Mivel az élesztősejteket a tészta különféle kémiai összetételében használják, a modellezés következménye annak szükségessége, hogy mérlegeljék az élesztősejtek anyagcseréjének alkalmazkodóképességét a kötött nitrogén különböző forrásaihoz (Brice, 2018). A sütőipari élesztő erjedési folyamatának modellezése javulhat úgy is, hogy figyelembe veszik a hőmérsékletnek a tésztaanyag biokémiai átalakulására gyakorolt hatását, az alacsonyabb hőmérsékletek jelentősen csökkentik az erjesztési folyamat sebességét, ugyanakkor javíthatják a termékek minőségét.

A hőmérséklet hatását be lehet iktatni a kinetikai egyenletekbe, lehetőleg dinamikus körülmények között, kifejezve a sejtek növekedési sebességét, de a hőmérséklet függvényében más kinetikai paramétereket is, amelyek értéke kiszámítható a reakciósebesség-eloszlás és a hőegyensúly alapján (da Costa, 2009). A kémiai összetevők egyedi tömegének segítségével kiszámolható az alkotóelemek egyedi sűrűsége és fajhője, és a hőmérleg segítségével ki lehet számítani a keverék hőmérsékletét, a kezdeti látszólagos sűrűséget, a kezdeti fajhőt és a tésztaanyag által tartalmazott hőmennyiségét. Ismerve a reakcióanyag kezdeti összetételét, ideértve a sejtek koncentrációját, szükségessé válik a sejtek maximális növekedési sebességének meghatározása, figyelembe véve a lehető legtöbb olyan tényezőt, amelyek befolyásolhatják a sejtek növekedését. Ezután megvizsgálunk egy frissített kinetikai modellt kiegészítve egy

klasszikus modellt a szükséges egyenletekkel. Így kiszámolható a kezdeti sejtnövekedési sebesség, kiszámítható a szubsztrát felhasználási sebessége és az etilalkohol előállítás sebessége. A szimulációs folyamat következő lépése a sejtekre, a szubsztrátumra és az etil-alkoholra vonatkoztatott reakciósebesség kiszámítása, majd a sejtek, a szubsztrátum és a termék koncentrációjának τ időtartam utáni újraszámítása.

A jobb szimuláció elérése érdekében javasoljuk a hőmérleg beépítését a keverék hőmérsékletének újraszámításához, figyelembe véve a hőátadást. Az erjedési folyamat során keletkező hőmennyiség a következő képlettel számítható ki:

$$Q_{gen} = (\Delta_r H) \cdot v_{rX} \cdot V$$

Ahol: $\Delta_r H$ - reakció entalpia;

v_{rX} – a sejtekre viszonyított reakciósebesség;

V – a reakciókeverék térfogata.

A folyamat során a kémiai fajok koncentrációit, a fajhőket, sűrűséget, a sejtek növekedési sebességét, a szubsztrát fogyasztásának sebességét, az etilalkohol képződési sebességét, a sejtekre, a szubsztrátumra és a termékre vonatkozó reakciósebességét, hőmérsékletet és a reakciótömeg térfogatát egyenlő műveleti időtartamokra vonatkoztatva (például 1 percenként) újraszámítjuk, és a célfunkció elérésekor leállítjuk a számítási ciklust.

IRODALMI JEGYZÉK

- [1] Handbook of dough fermentation, Kulp K., 2003
- [2] Brewing Yeast Fermentation Performance, Smart K., 2003
- [3] Effect of baker's yeast storage on its viability, activity and bread making, Abulhassan A.M.H., 1981
- [4] Intensification de la production d'ethanol. Modelisation et strategie de conduite. Teză de doctorat, Universitatea din Toulouse, Chaabane M.F.B., 2006
- [5] Kinetics of Ethanol Fermentation with High Biomass Concentration Considering the Effect of Temperature, Atala D.I.P. și colab., 2001
- [6] Groot és mtsai. - Kinetics of ethanol production by baker's yeast in an integrated process of fermentation and micro filtration, Bioprocess Engineering, 1992
- [7] Damiano és mtsai. - Performance, kinetics, and substrate utilization in a continuous yeast fermentation with cell recycle by ultrafiltration membranes, Applied Microbiology and Biotechnology, 21, 1985
- [8] Jarzebski és mtsai. - Modeling of Ethanol Fermentation at High Yeast Concentrations, Biotechnology and Bioengineering, 34, 1989
- [9] Nestor, S.- The (Mathematical) Modeling Process in Biosciences, Frontiers in Genetics, 6, 354, 2015
- [10] Oliveira és mtsai. - Ana Bio Plus: a new package for parameter estimation and simulation of bioprocesses, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 34, 04, 2017
- [11] Asada, M. - Material characterization of alcohol-water mixtures for the numerical simulation of heat transfer in micro-channels, Teză de doctorat, Universitatea din Hawaii, 2012
- [12] Brice és mtsai. - Adaptability of the *Saccharomyces cerevisiae* yeasts to wine fermentation conditions relies on their strong ability to consume nitrogen, Plos One, 13(2), 2018
- [13] Liu és mtsai. - Effects of fermentation on the rheological characteristics of dough and the quality of steamed bread, Journal of Food Processing and Preservation, 2019
- [14] da Costa és mtsai. - Modeling, simulation and analysis of ethanol fermentation process with control structure in industrial scale, 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2009