PIVO ISHLAB CHIQARISHDA FERMENTLASH JARAYONINI MODELLASHTIRISH

Yusupbekov Azizbek Nodirbekovich
Toshkent davlat texnika universiteti, kafedra mudiri, t.f.d.prof
ORCID: 0000-0002-4023-6603
E-mail: abek71@mail.ru
Yusupov Mirjalol Shovkat o‘g‘li
Toshkent davlat texnika universiteti, tayanch doktorant
ORCID: 0009-0009-1671-7747
E-mail: yusupovmirjalolmm@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada pivo ishlab chiqarishning fermentatsiya jarayoni matematik modellashtirilgan va ishlab chiqilgan matematik model asosida asosiy parametrlarning vaqtga bog‘liq o‘zgarishi tahlil qilingan. Model fermentatsiya davomida glyukoza, maltoza, etanol, karbonat angidrid va aromatik birikmalarining konsentratsiyasining dinamik tarzda o‘zgarishini ko’rsatadi. Olingan natijalar pivo sifati, ta’mi va barqarorligini ta’minlashda parametrlarni nazorat qilishning muhimligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: Fermentatsiya, pivo ishlab chiqarish, matematik modellashtirish, parametrlar nazorati, aroma birikmalari.

Аннотация: В данной статье на основе разработанной математической модели процесса ферментации пива анализируется изменение основных параметров во времени. Модель демонстрирует динамику концентрации глюкозы, мальтозы, этанола, углекислого газа и ароматических соединений в процессе ферментации. Полученные результаты подтверждают важность контроля параметров для обеспечения качества, вкуса и стабильности пива.

Ключевые слова: Ферментация, пивоварение, математическое моделирование, контроль параметров, ароматические соединения.

Abstract: This article analyzes the time-dependent variation of key parameters in the beer fermentation process based on a developed mathematical model. The model illustrates the dynamic concentration changes of glucose, maltose, ethanol, carbon dioxide, and aromatic compounds during fermentation. The results confirm the importance of parameter control to ensure beer quality, flavor, and stability.

Keywords: Fermentation, beer production, mathematical modeling, parameter monitoring, aroma compounds.

Kirish

Pivo sanoati asrlar davomida shakllangan bo‘lib, ayni paytda esa raqamli texnologiyalar bilan boyitilib borayotgan eng rivojlangan oziq-ovqat tarmoqlaridan biridir. Ushbu tarmoqda sifat, barqarorlik va texnologik xavfsizlikka bo’lgan

ISSN 3030-3907

talablar ortib borar ekan, ishlab chiqarish jarayonlarini chuqur tahlil qilish, modellashtirish va avtomatik boshqaruvga integratsiya qilish muhim vazifaga aylanmoqda. Pivo ishlab chiqarishning eng murakkab va ta’sirchan bosqichlaridan biri bu fermentatsiya jarayoni bo’lib, u ichimlikning asosiy xususiyatlarini, xususan, alkogol miqdori, karbonat angidrid darajasi, aromatik komponentlari va umumiy barqarorlikni belgilovchi asosiy bosqich hisoblanadi [1].

Fermentatsiya jarayoni bu biologik, kimyoviy va issiqlik hodisalarining bir vaqtning o‘zida yuz beradigan murakkab nochiziqli jarayoni bo‘lib, u ko‘p sonli parametrlar, masalan, harorat, bosim, substrat konsentratsiyasi, biomassa o‘sishi va gaz almashinuvi kabi faktorlar ta’sirida kechadi [2], [3]. Ushbu parametrlarning har biri fermentatsiya mahsulotlariga bevosita yoki bilvosita ta’sir ko’rsatadi. Harorat fermentativ reaksiyalarning kinetikasini belgilovchi asosiy faktor bo’lsa, bosim karbonat angidridning gaz fazasiga o‘tishini va ingibatsiyani tartibga soladi. Substrat va biomassa konsentratsiyasi esa spirtli mahsulotlar hosil bo‘lishining asosiy dinamik ko‘rsatkichlaridir.

Zamonaviy yondashuvga ko‘ra, ushbu parametrlar asosida fermentatsiya tizimini matematik modellashtirish, uzatish funksiyalari orqali kirish va chiqish o‘zgaruvchilari o‘rtasidagi aloqalarni aniqlash, real vaqt rejimida monitoring va avtomatik boshqaruv tizimlarini qurish imkonini beradi. Ayniqsa, SCADA, dasturlanuvchi kontrollerlar va IoT (internet ashyolari) texnologiyalarining ishlab chiqarish tizimlariga integratsiyasi jarayonni yuqori aniqlikda nazorat qilish va samaradorlikni oshirish imkonini yaratmoqda.

Ushbu maqolada fermentatsiya jarayonining matematik modeli asosida uning asosiy parametrlar bilan bog‘liqligi tahlil qilinadi. Model Mikaelis–Menten kinetikasi va Arrenius qonuni asosida tuzilgan bo’lib, substrat sarfi, biomassa o‘sishi, etanol va karbonat angidrid hosil bo‘lishi, shuningdek aromatik komponentlarining shakllanishi kabi asosiy jarayonlar differensial tenglamalar orqali ifodalanadi. Modellash natijalari asosida uzatish funksiyalari aniqlanib, har bir kirish-chiqish juftligi uchun tizim dinamikasi baholanadi.

Tadqiqot metodologiyasi.

Pivo fermentatsiyasi jarayonini matematik modellashtirish va uzatish funksiyalarini aniqlash uchun bir nechta ketma-ket bosqichli ilmiy yondashuv asos qilib olindi. Tadqiqotning asosiy maqsadi fermentatsiya tizimini o‘lchab bo‘ladigan fizik parametrlar (harorat, bosim, sarf va sath) bilan ifodalash, uning chiqish kattaliklari (etanol, karbonat angidrid, biomassa va aromatik komponentlari) bilan o‘zaro bog‘liqligini modellashtirish va avtomatik boshqaruv uchun mos tizimli tavsifga keltirishdan iborat.

ISSN 3030-3907

Jarayon avvalo biologik kinetik qonunlar asosida tavsiflandi. Bunda substratning fermentativ parchalanishi, achitqi hujayralarining o‘sishi, hosil bo‘ladigan metabolitlarning shakllanishi va gazlar almashinuvi Mikaelis–Menten kinetikasi asosida ifodalandi. Haroratning fermentativ jarayonga ta’siri esa Arrenius qonuniga binoan eksponensial funksiya tarzida modellandi. Harorat va bosim parametrlarining modelga kiritilishi muhit sharoitlarining biologik o‘sish tezligiga real ta’sirini inobatga olishga imkon berdi [4].

Fermentatsiya jarayoni substrat konsentratsiyasi *S(t)*, biomassa miqdori *X(t)*, etanol *E(t)*, karbonat angidrid *C(t)*, etilatsetat *EtAs(t)*, atsetaldegid *AsA(t)* kabi asosiy komponentlar orqali tavsiflanadi [5]. Tashqi fizik kirish kattaliklari sifatida harorat *T(t)*, fermentator bosimi *P(t)*, kiruvchi suyuqlik sarfi *Q(t)* va fermentatordagi suyuqlik sathi *h(t)* qabul qilinadi [6], [7]. Jarayonni modellashtirish va identifikatsiyalash uchun dastlab fermentatsiya mahsuloti bo’lgan substratning o‘zgarishi asosida ifodalarni tuzib boshlaymiz. Subtraktning o‘zgarishi tezligi μ quyidagicha ifodalanadi (1)[8]:

$$\mu(S,T,P) = \mu_{max} \cdot \frac{S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_I}} \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot f_P(P) \qquad (1)$$

bu yerda μ_{max} maksimal o‘sish tezligi, K_S substrat to‘yinish konstantasi, K_I substrat ingibitlanishi konstantasi, E_a fermentatsiya uchun faollanish energiyasi, $f_P(P)$ bosimga bog‘liq ingibitlanish funksiya bo‘lib, odatda quyidagicha tanlanadi:

$$f_P(P) = \frac{1}{1+\beta P} \qquad (2)$$

Fermentatsiya jarayonining asosiy tenglamalari differensial shaklda quyidagicha yoziladi (3):

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\mu(S,T,P) \cdot X \\ \frac{dX}{dt} = (\mu(S,T,P) - k_d) \cdot X \\ \frac{dE}{dt} = Y_{\frac{E}{X}} \cdot \mu(S,T,P) \cdot X \\ \frac{dC}{dt} = Y_{\frac{C}{X}} \cdot \mu(S,T,P) \cdot X - k_{La}\left(C - C_{to'y}\right) \\ \frac{dEtAs}{dt} = k_{Et} \cdot X - k_{Et,d} \cdot EtAs \\ \frac{dAsA}{dt} = k_{As} \cdot X - k_{As,d} \cdot AsA \end{cases} \qquad (3)$$

bu yerda, k_d biomassa kamayish konstantasi, $Y_{E/X}, Y_{C/X}$ mos ravishda etanol va karbonat angidrid uchun hosildorlik koeffitsiyenti, K_{La} CO_2 ning suyuqlikdan gaz fazasiga o’tish tezligi, $C_{to'y}$ CO_2 ning suvdagi maksimal eruvchanligi, k_{Et}, $k_{Et,d}$, k_{As}, $k_{As,d}$ substrat komponentlar hosil bo’lish va parchalanish tezlik konstantalari.

Natijalar tahlili.

ISSN 3030-3907

Ushbu fermentatsiya jarayonining matematik modeli asosida qurilgan differensial tenglamalar tizimi pivo ishlab chiqarish jarayonidagi glyukoza, maltoza, maltotrioza, etanol, karbonat angidrid, etilatsetat va asetaldegid vaqtga bog'liq dinamikasini ifodalaydi. Modellashtirilgan bu tizimda $\mu(S,T,P)$ fermentatsiya tezligi harorat, substrat konsentratsiyasi va bosimga bog'liq holda ifodalangan bo'lib, u real biologik tizimlarga yaqinlashtirilgan.

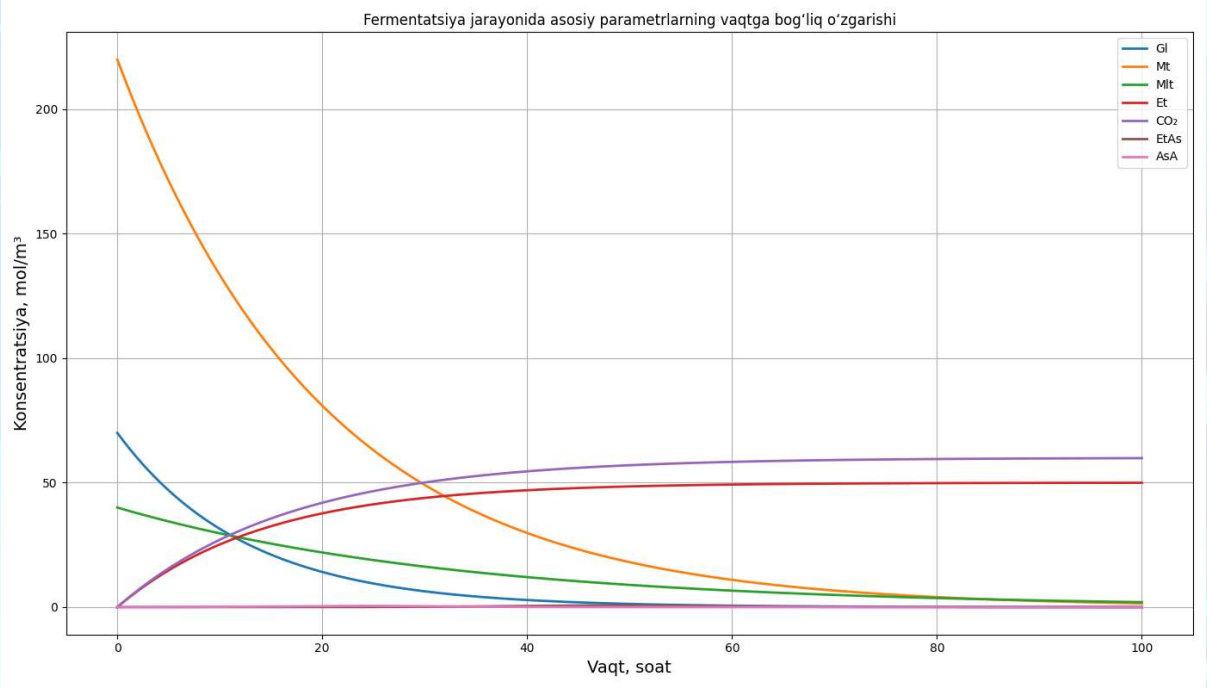
1-rasm fermentatsiya davomida asosiy metabolitlar konsentratsiyasining vaqt bo'yicha o'zgarishini aniq ko'rsatadi. Dastlabki vaqtlarda glyukoza, maltoza va maltotrioza konsentratsiyalari eng yuqori darajada bo'lib, fermentatsiya davom etgan sari ular tezlik bilan kamayib boradi. Bu esa achitqilar tomonidan ushbu substratlarning faol utilizatsiya qilinayotganligini ko'rsatadi. Ayniqsa, glyukozaning tez kamayishi uni asosiy metabolik energiya manbai sifatida ishlatilayotganini bildiradi.

Modelda etanol konsentratsiyasi turg'un tarzda ortib boradi va ma'lum vaqtdan so'ng to'yinganlik holatiga erishadi. Bu fermentatsiya kinetikasiga xos bo'lgan holat bo'lib, substratlar kamaygan sari spirt ishlab chiqarilishi sekinlashadi. Xuddi shu tendensiya karbonat angidrid uchun ham kuzatiladi. Karbonat angidridning suyuqlikdan gaz fazasiga o'tishini ifodalovchi k_{La} koeffitsiyentining o'zgarishi sharoitga qarab mahsulotdagi karbonatlanganlik darajasini sozlash mumkin.

EtAs va AsA aromatik komponentlar bo'lib, ularning shakllanishi muvozanatlashgan tarzda, ya'ni fermentatsiya davomida sekin-asta yuzaga chiqadi. Asetaldegid jarayonda biroz muddatdan so'ng parchalanib ketadi. Natijada yakuniy mahsulotdagi achchiq ta'm va iforlarning kamayishiga xizmat qiladi. Bu fermentatsiya jarayonida ta'm xususiyatlarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega bo'ladi.

Karbonat angidridning eruvchanlik darajasi ham modelda $C_{t0\gamma}$ parametri orqali baholangan bo'lib, bu esa bosim va harorat bilan bevosita bog'liq. Bosimni oshirish yoki haroratni kamaytirish orqali karbonat angidridni pivo ichida ushlab turish mumkin. Bu esa karbonizatsiyalangan pivolarning xossalarini barqaror saqlashda muhim rol o'ynaydi.

ISSN 3030-3907



1-rasm. Fermentatsiya davomida asosiy metabolitlar konsentratsiyasining vaqt bo’yicha o’zgarishi.

Fermentatsiya jarayonining bunday murakkab modelda ifodalanishi amaliy jihatdan pivo ishlab chiqarish korxonalarida avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarini yaratish uchun asos bo’lib xizmat qiladi. Ayniqsa, harorat, bosim, pH, kislorod darajasi, va substrat konsentratsiyasining real vaqt rejimida monitoring qilinishi ushbu model yordamida prognoz qilinishi mumkin bo’ladi.

Model natijalari har bir parametrga o’zgarish kiritish orqali fermentatsiya jarayonining qanday kechishini tahlil qilish imkonini beradi. Natijada esa boshqaruv yoki optimallashtirish algoritmlari yordamida samarali boshqaruv tizimi ishlab chiqishga zamin yaratadi. Ushbu modelga asoslangan SCADA yoki IoT platformalarda qurilgan tizimlar fermentatsiya jarayonining har bir bosqichini boshqarishga imkon beradi.

Xulosa.

Pivo ishlab chiqarishda fermentatsiya jarayoni kimyoviy va biologik o’zgarishlarning murakkab kombinatsiyasidan iborat bo’lib, uning samaradorligi va mahsulot sifatini ta’minlash uchun jarayon parametrlarini doimiy nazorat qilish va boshqarish zarur. Yuqoridagi model ushbu parametrlar o’rtasidagi bog’liqlikni ifodalaydi va ular orqali fermentatsiya natijalarini bashorat qilish imkonini beradi. Ayniqsa, substratlarning parchalanishi va mahsulotlarning (etanol, karbonat angidrid, aroma komponentlar) hosil bo’lish dinamikasi, ular orasidagi nisbiy munosabatlar, bosim va harorat kabi tashqi omillar ta’sirini chuqur tahlil qilish imkonini beradi.

ISSN 3030-3907

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

[1] C. W. Bamforth, ‘Progress in Brewing Science and Beer Production’, *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 161–176, Jun. 2017, doi: 10.1146/annurev-chembioeng-060816-101450.

[2] B. Muster-Slawitsch, M. Hubmann, M. Murkovic, and C. Brunner, ‘Process modelling and technology evaluation in brewing’, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 84, pp. 98–108, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.cep.2014.03.010.

[3] A. Bowler, J. Escrig, M. Pound, and N. Watson, ‘Predicting Alcohol Concentration during Beer Fermentation Using Ultrasonic Measurements and Machine Learning’, *Fermentation*, vol. 7, no. 1, p. 34, Mar. 2021, doi: 10.3390/fermentation7010034.

[4] V. L. Arcus, M. W. Van Der Kamp, C. R. Pudney, and A. J. Mulholland, ‘Enzyme evolution and the temperature dependence of enzyme catalysis’, *Curr. Opin. Struct. Biol.*, vol. 65, pp. 96–101, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.sbi.2020.06.001.

[5] M. F. Kabir and L.-K. Ju, ‘On optimization of enzymatic processes: Temperature effects on activity and long-term deactivation kinetics’, *Process Biochem.*, vol. 130, pp. 734–746, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.procbio.2023.05.031.

[6] N. F. Abunde, N. Y. Asiedu, and A. Addo, ‘Modeling, simulation and optimal control strategy for batch fermentation processes’, *Int. J. Ind. Chem.*, vol. 10, no. 1, pp. 67–76, Mar. 2019, doi: 10.1007/s40090-019-0172-9.

[7] N. Y. Asiedu, N. F. Abunde, and A. Addo, ‘Modeling and Simulation of Substrate and Product Inhibitions of Fermentation of Cassava (*Manihot Esculenta*) Extract’, *Ind. Biotechnol.*, vol. 12, no. 5, pp. 303–316, Oct. 2016, doi: 10.1089/ind.2016.0001.

[8] K. Itto-Nakama *et al.*, ‘AI-based forecasting of ethanol fermentation using yeast morphological data’, *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, vol. 86, no. 1, pp. 125–134, Dec. 2021, doi: 10.1093/bbb/zbab188.

ISSN 3030-3907