

UDK 663.15

Najmanjša poraba energije pri fermentacijskem postopku*

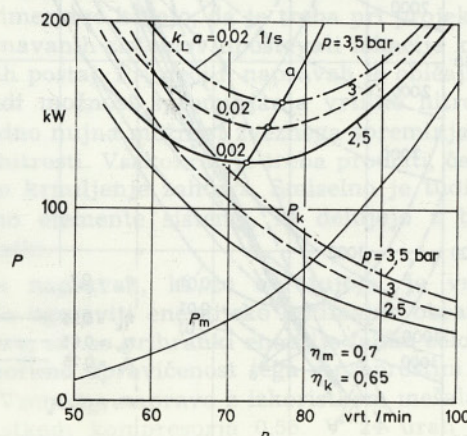
MIRAN OPREŠNIK — MIRKO OPARA

Naprave, potrebne za fermentacijo, naj bi zagotovile optimalne življenjske razmere mikroorganizmom. V velikem številu primerov je za te namene primerna posoda z mešalom. Običajno so to posode z višino, ki je 2 do 3-krat večja od premera, z vgrajenimi motilniki toka in pogosto s turbinskimi mešali ter obročnim razdelilnikom zraka.

Naprava naj bi predvsem zagotovila potrebni snovni tok in prenos toplote. V nadaljevanju prenosa toplote ne bomo zajeli. Kisik, potreben pri aerobnih fermentacijah, dovajamo z zrakom. Če so delci v fermentacijski brozgi majhni in/ali reakcijske hitrosti majhne, prevladuje upornost pri prenosu snovi na strani tekočine. Odločujoča je torej snovska prestopnost na meji plin — tekočina ($k_L a$). V takšnih primerih lahko s spremembo obratovalnih razmer v fermentorju dosežemo izboljšanje preskrbe s kisikom. Spreminjanje obratovalnih razmer pa pomeni spreminjanje vrtilne hitrosti mešala n in spreminjanje pretoka zraka q . Oboje je povezano s porabo energije. Ker se med procesom spreminja potrebna snovska prestopnost, moramo zahtevani prestopnosti ustrezno prilagajati obratovalne razmere, ki naj pomenijo najmanjšo porabo energije. Porabljen energija pa je vedno seštevek energije za pogon mešala in energije za komprimiranje zraka.

V nadaljevanju bomo prikazali, kako vplivajo različne obratovalne razmere na moč. Za primer izračuna smo vzeli fermentacijsko brozgo, za katero so snovske vrednosti podane [1]. Tam so tudi podatki o fermentorju. Potrebno moč za pogon mešala smo računali po Millerju [2], ker so meritve [3] pokazale primerno ujemanje [7]. Potrebno moč za komprimiranje zraka smo računali za adiabatno kompresijo. Na sliki 1 je prikazan vpliv kompresijskega tlaka na celotno moč pri snovski prestopnosti $k_L a = 0,02$ l/s. Izbrana sta izkoristek mešala $\eta_m = 0,7$ in izkoristek kompresorja $\eta_k = 0,65$. Vrednosti so izračunane za tri različne tlake po kompresiji zraka p . Celotna moč je vsota moči za pogon mešala P_m in moči za komprimiranje zraka P_k

$$P = P_m + P_k$$



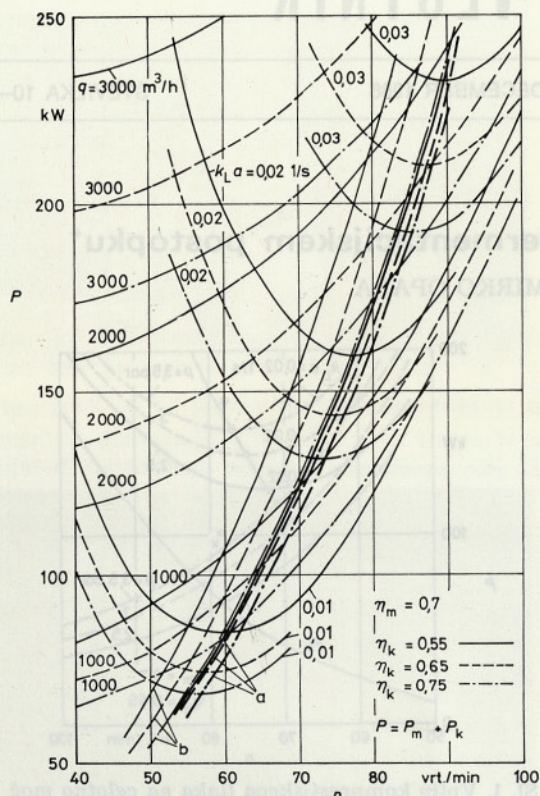
Sl. 1. Vpliv kompresijskega tlaka na celotno moč
a — optimalna krivulja

Povečanje tlaka p pomeni večjo potrebno celotno moč ter premik optimalne točke v področje večjih vrtljajev in ustrezno manjše količine potrebnega zraka za isto snovsko prestopnost $k_L a$. Za izračunani primer pomeni zmanjšanje tlaka za 1 bar kar dobrih 20 odstotkov prihranka energije, računano na optimalno obratovanje. Zato je treba že pri projektiranju razmisliti o mogoči lokaciji kompresorske postaje, da bi bili padci tlaka čim manjši in s tem zahtevani končni tlak po kompresiji zraka tudi čim manjši.

Na sliki 2 je prikazan vpliv izkoristka kompresorja na celotno moč za tri različne snovske prestopnosti $k_L a$ in za tri različne izkoristke kompresorja. Večji izkoristek kompresorja pomeni seveda občutno zmanjšanje potrebne celotne moči, še posebno pri večjih snovskih prestopnostih. Za optimalno obratovanje pa dana snovska prestopnost terja večjo količino zraka in temu ustrezno manjšo vrtilno hitrost mešala. S slike je lepo razvidno, da se optimalne obratovalne točke z zmanjševanjem snovske prestopnosti premikajo v področje nižjih vrtljajev in manjše količine zraka.

Če pri določenem pretoku zraka zmanjšamo število vrtljajev pod določeno vrednost, potem mešalo ne more več dispergirati zraka in s tem opravljati potrebne funkcije. Ta stanja na meji imenujemo poplavne točke. Izračunali smo jih po Wiedmannu [4]. Zveznice izračunanih poplavnih točk so vrisane v diagram kot poplavne krivulje.

* Raziskavo sta omogočili Tovarna zdravil Krka, Novo mesto in RSS. Obema hvala!

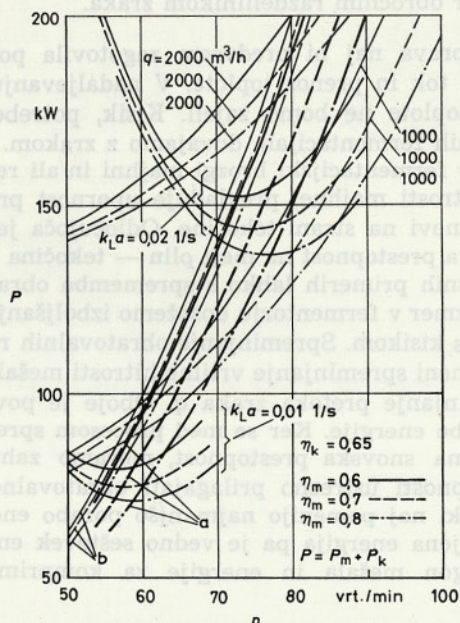


Sl. 2. Vpliv izkoristka kompresorja na celotno moč
a — optimalna krivulja, b — poplavna krivulja

Pri danem pretoku zraka in pri slabem izkoristku kompresorja je mogoče bolj zmanjšati vrtilno hitrost, preden dosežemo poplavno krivuljo, kakor pa pri boljših izkoristkih kompresorja. Podobne so razmere pri enaki snovski prestopnosti. Tudi tu lahko podobno zmanjšujemo vrtilno hitrost in ustrezno povečujemo pretok zraka, preden dosežemo poplavno krivuljo, kadar imamo opraviti s slabšimi izkoristki kompresorja. Pri boljših izkoristkih kompresorja je mogoče le malo povečati pretok zraka in zmanjšati vrtilno hitrost. Iz prikazanega je razvidno, da se najugodnejša rešitev za porabo energije za dano snovsko prestopnost ne ujema s poplavno točko, da pa sta ti dve vrednosti vsaj pri boljših izkoristkih kompresorja razmeroma blizu. Za izračunani primer bi bila poraba energije pri snovski prestopnosti $k_L a = 0,03$ 1/s za dobrih 17 odstotkov manjša, če bi imeli kompresor z 20-odstotnim boljšim izkoristkom.

Pri zahtevani snovski prestopnosti obratovanje pri manjših vrtilnih hitrostih od optimalnih v splošnem prepreči poplavna točka. Povečevanje vrtilne hitrosti in temu ustrezno zmanjševanje pretoka zraka pa močno povečuje potrebno celotno moč. Ta ugotovitev je pomembna pri napravah, pri katerih ne moremo spreminjati vrtilne hitrosti, ampak samo pretočno količino zraka.

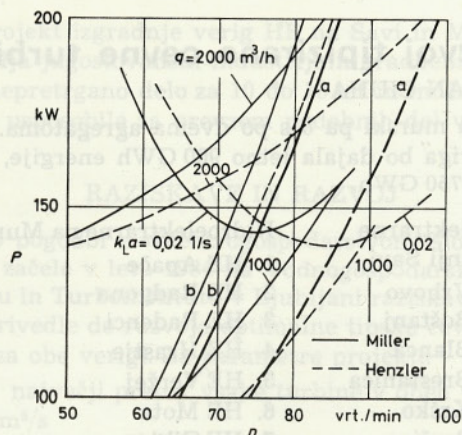
Na sliki 3 je prikazan vpliv izkoristka mešala. Izkoristek kompresorja je $\eta_k = 0,65$. Prav nasprotno kakor pri vplivu izkoristka kompresorja terja povečanje izkoristka mešala za optimalno obratovanje manjšo količino zraka in večjo vrtilno hitrost. V nasprotju z boljšim izkoristkom kompresorja pa pomeni boljši izkoristek mešala večjo možnost za zmanjševanje vrtilne hitrosti pri enakem pretoku, preden dosežemo poplavno krivuljo. To velja tudi za razmere pri enaki snovski prestopnosti, kjer je tolerančni pas, v katerem lahko zmanjšujemo vrtilno hitrost in ustrezno povečujemo pretok, pri boljših izkoristkih mešala bistveno širši. Pri enaki snovski prestopnosti $k_L a = 0,03$ 1/s kot smo jo navedli pri vplivu izkoristka kompresorja, pa bi povečanje izkoristka mešala za 20 odstotkov prineslo prihranek dobrih 10 odstotkov energije.



Sl. 3. Vpliv izkoristka mešala na celotno moč
a — optimalna krivulja, b — poplavna krivulja

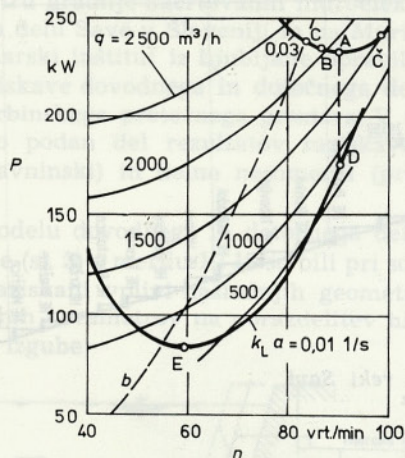
Seveda pa lahko potrebno moč za pogon mešala računamo po enačbah različnih avtorjev. Za primerjavo so na sliki 4 prikazane vrednosti, izračunane po Millerju [2] in po Henzlerju [5]. Za enako snovsko prestopnost terja enačba po Henzlerju za optimalno obratovanje večjo vrtilno hitrost, potrebna moč pa je nekoliko manjša kakor pri Millerju pri sicer enaki količini zraka. Tolerančno območje med optimalno krivuljo in poplavno krivuljo po Wiedmannu je precej večje pri Henzlerju kakor pri Millerju.

Velja opozoriti, da v splošnem snovske prestopnosti $k_L a$ ne moremo dovolj natančno določiti samo s fizikalnimi lastnostmi, ampak jo moramo šteti za specifičnost sistema [6]. Pomembna je tudi odvisnost potrebne specifične moči od velikosti reaktorja.



Sl. 4. Primerjava vrednosti po Millerju in Henzlerju
a — optimalna krivulja, b — poplavna krivulja

Ta ugotovitev izhaja iz primerjave vrednosti moči, potrebnih za pogon mešala, izračunanih po enačbah različnih avtorjev [7] ter eksperimentalnih podatkov [8]. Če za nek sistem poznamo ustrezne vrednosti fizikalnih podatkov in časovno odvisnost potrebne snovske prestopnosti, potem v navedenih razmerah ni težko določiti časovne odvisnosti obratovalnih parametrov. Za primer je na sliki 5 narisana možnost spremembe snovske prestopnosti. Pri neki zahtevani snovski prestopnosti je optimalno obratovanje npr. v točki A. Enako snovsko prestopnost lahko dosežemo tudi z zmanjšanjem vrtilne hitrosti in ustreznim povečanjem pretoka zraka (točka B),



Sl. 5. Mogoči načini obratovanja
b — poplavna krivulja

vendar bo v tem primeru porabljena moč nekoliko večja. Bistveno pa vrtilne hitrosti ne moremo zmanjšati, ker razmeroma hitro dosežemo poplavno točko (točka C). Enako snovsko prestopnost pa lahko dosežemo tudi s povečanjem vrtilne hitrosti in ustreznim zmanjšanjem pretoka zraka (točka Č). Vendar pa povečanje vrtilne hitrosti močno povečuje porabo moči. Če sedaj proces v določenem časovnem

trenutku terja manjšo snovsko prestopnost, lahko to dosežemo na različne načine. Če nimamo možnosti spreminjati vrtilne hitrosti, bomo zmanjšanje dosegli z zmanjševanjem pretočne količine zraka (točka D). Bolj ugodno pa je, če lahko hkrati zmanjšujemo tako vrtilno hitrost kakor tudi pretočno količino zraka in tako dosežemo tudi pri novi snovski prestopnosti optimalne obratovalne razmere (točka E). Obratovanje v točki E namesto v točki D pa v izračunanem primeru pomeni 50 odstotkov prihranka energije.

Primerjave kažejo, da je treba pri projektiranju obravnavanih sistemov upoštevati lokacije kompresorskih postaj. Pri večjih napravah je običajno nujna tudi možnost spreminjanja vrtilne hitrosti. Ni pa vedno nujna možnost zveznega spreminjanja vrtilne hitrosti. Vsakokrat je treba proučiti, če proces takšno krmiljenje zahteva. Smiselno je tudi, če izberemo elemente sistema, ki delujejo z boljšimi izkoristki.

Pri napravah, ki že obratujejo, je vsekakor vredno ugotoviti energijsko optimalne obratovalne razmere, saj so prihranki energije lahko zelo veliki. Ponazorimo upravičenost tega s preprostim primerom. Vzemimo napravo z izkoristkom mešala 0,7 in izkoristkom kompresorja 0,55. V 24 urah naj bo zahtevana snovska prestopnost $\frac{1}{3}$ časa 0,03 1/s, $\frac{1}{3}$ časa 0,02 1/s in $\frac{1}{3}$ časa 0,01 1/s. Potrebne vrednosti moči lahko razberemo s slike 2. Če bi naprava 24 ur delovala pri največji mogoči vrtilni hitrosti z največjo količino zraka za optimalno delovanje pri snovski prestopnosti 0,03, bi porabili približno 5600 kWh energije. Če bi spreminjali samo pretok zraka, bi lahko prihranili 1000 kWh energije ali dobrih 17 odstotkov. Če pa bi spreminjali vrtilno hitrost in pretok zraka in vsakokrat obratovali v optimalni točki, bi prihranili približno 1760 kWh energije ali dobrih 31 odstotkov. To pa so številke, ki so pri večjih napravah vsekakor vredne razmisleka.

LITERATURA

- [1] Jurečič, R., Berović, M., Steiner, W., Koloini, T.: Mass Transfer in Aerated Fermentation Broths in a Stirred Tank Reactor. *Canad. J. Chem. Eng.* 62 (1984) jun., 334/339.
- [2] Miller, D. N.: Scale-up of Agitated Vessels Gas-Liquid Mass Transfer. *AIChE J.* 20 (1974) 3, 445/453.
- [3] Energijska bilanca fermentorja. Poročilo. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1985.
- [4] Wiedmann, J. A.: Zum Überflutungsverhalten zwei- und dreiphasig betriebener Rührreaktoren. *Chem.-Ing.-Tech.* 55 (1983) 9, 689/700.
- [5] Henzler, H.-J.: Verfahrenstechnische Auslegungsunterlagen für Rührbehälter als Fermenter. *Chem.-Ing.-Tech.* 54 (1982) 5, 461/476.
- [6] Carpenter, K.-J.: Fluid Processing in Agitated Vessels. *Chem Eng Res Des* 64 (1986) 1, 3/9.
- [7] Oprešnik, M., Opara, M.: Potrebna snaga za mešanje u industrijskim uredajima. *Procesna tehnika* (v tisku).
- [8] Nienow, A. W., Konno, M., Bujalski, W.: Studies on Three-Phase Mixing: A Review and Recent Results. *Chem Eng Res Des* 64 (1986) 1, 35/42.

Naslov avtorjev: prof. dr. Miran Oprešnik, dipl. inž.,
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana
prof. dr. Mirko Opara, dipl. inž.,
SMELT, Ljubljana