

# PROUČAVANJE KINETIKE PROCESA IZDVAJANJA KAJMAKA

Osnove novog proizvodnog tehnološkog postupka

Miodrag MATOVIĆ, dipl. inž., dr. Dimitrije VORONJEC, dipl. inž., Mašinski fakultet, Beograd, Dr. Vladeta PAVASOVIĆ, dipl. inž., Zoja ILIĆ, dipl. inž., Institut »Boris Kidrič«, Vinča, Dr. Bogoje STEVIĆ, dipl. inž. Poljoprivredni fakultet, Beograd

## Sažetak

*U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja kinetike procesa izdvajanja kajmaka iz mleka, sa ciljem da se dobijeni podaci iskoriste kao podloga za razvoj novog proizvodnog tehnološkog postupka.*

*Izdvajanje kajmaka obavljeno je u instalacijama laboratorijskih razmera. U toku procesa, mleko je stalno zagrevano na povišene temperature, a iznad slobodne površine strujao je zagrejani vazduh. Parametri procesa, čiji je uticaj na prinos kajmaka proučavan, bili su: visina sloja mleka, temperature mleka i vazduha i brzina strujanja vazduha.*

*Dobijeni eksperimentalni rezultati ukazuju da se pogodnim izborom radnih parametara procesa, mogu ostvariti takve brzine izdvajanja kajmaka koje su nekoliko puta veće u odnosu na brzine procesa ostvarene pri tradicionalnim postupcima proizvodnje.*

## Uvod

Prehrambena industrija posvećuje veliku pažnju proizvodnji i preradi mleka, jer su ovi proizvodi veoma značajni za ishranu ljudi. Uvođenje industrijskih postupaka u proizvodnju, distribuciju i preradu mleka uslovalo je: porast proizvodnje mleka kao osnovne sirovine, proširenje asortimana gotovih proizvoda od mleka, ujednačenost kvaliteta i higijensku ispravnost prerađevina.

Kajmak je specifična mlečna prerađevina, koja se još uvek isključivo proizvodi na tradicionalni način, a u okvirima individualne aktivnosti u manjim količinama. Povećana potražnja kajmaka na domaćem tržištu nije uslovila industrijsku proizvodnju. Učinjeni su bili pokušaji, da se proizvodnja kajmaka usvoji kao industrijski tehnološki postupak koji će garantovati kvalitet, higijensku ispravnost, visoke prinose u odnosu na mleko kao polaznu sirovinu, a sve uz umerene energetske i materijalne utroške (4), ali su oni za sada ostali bez značajnijih rezultata.

Ovaj rad sumira rezultate eksperimentalnih istraživanja najznačajnijih operacija sadržanih u idejno rešenom tehnološkom postupku proizvodnje kajmaka. Izdvajanje kajmaka je ključna operacija u postupku, koja se može uspešno realizovati samo ukoliko se dobro poznaje proces izdvajanja osnovnih mlečnih sastojaka na slobodnoj površini mleka. Složenost procesa izdvajanja kajmaka povezana je sa mehanizmima formiranja aglomerisanih masnih kapljica, njihovog kretanja u koloidnom rastvoru, koagulaciji belančevina na površini mleka u kontaktu sa vazduhom i drugih. U literaturi, osim radova koji proizvodnju kajmaka opisuju kao deo folklornih običaja u našim krajevima (2), ima malo podataka o mehanizmima procesa (5), i nešto više podataka o mikrobiološkim istraživanjima (1), dok su pionirski radovi Stevića (3, 4) jedini koji razmatraju mogućnost industrijske proizvodnje.

## Proces izdvajanja kajmaka i uticajni parametri

Proces izdvajanja kajmaka je složen difuzioni proces koji se odvija na slobodnoj površini mleka u zoni kontakta mleka sa vazduhom i u masi mleka.

Kako je mleko višekomponentni sistem složenog biohemijskog sastava, to su i mehanizmi odvijanja procesa vrlo komplikovani.

Uprošćeno, mleko možemo posmatrati kao emulziju mlečne masti (masnih kapljica prečnika 1—10 mikrometara) u koloidnom rastvoru belančevina u vodi (belančevine su u dva oblika: kazein u obliku micela prečnika 50—100 nm i albumin a relativni udeli su oko 4 : 1). Masne kapljice poseduju višeslojnu opnu, koja ima osobinu aktivnog dipola koji je svojim hidrofobnim krajem okrenut ka unutrašnjosti kapljice, a hidrofilnim krajem ka spoljašnjoj sredini (vodenoj fazi). Na taj način opna povećava stabilnost masnih kapljica u vodenoj fazi.

U mleku, ostavljenom da miruje, dolazi do postepenog isplivavanja masnih kapljica pod dejstvom gravitacione sile nastale usled razlike gustina mlečne masti i vodenog rastvora. Brzina isplivavanja znatno je veća od one koja odgovara masnim kapljicama prečnika 1—10  $\mu\text{m}$ . Povećanje brzine posledica je stvaranja aglomerata kapljica masti prečnika i preko 50  $\mu\text{m}$ . U omotaču masnih kapljica nalazi se belančevina euglobulin, koja smanjuje potencijalnu barijeru između kapljica i time potpomaže stvaranje njihovih aglomerata. Euglobulin je termički labilan, razgrađuje se na temperaturama preko 63 °C.

Drugi važan mehanizam pri izdvajanju kajmaka je koagulacija belančevina na površini kontakta mleka sa vazduhom. Posledica je narušavanja ravnoteže u koloidnom sistemu belančevine — voda. U literaturi nema podataka koji tumače mehanizam ovakve koagulacije belančevina u mleku.

Na osnovu uprošćene slike o mehanizmima koji uslovljavaju izdvajanje kajmaka, mogu se definisati glavne pogonske sile procesa:

- razlika koncentracija vlage u sistemu mleko-kajmak-vlažan vazduh,
- vlažan vazduh,
- razlika gustina vodene i masne faze,

Posmatranjem ovih pogonskih sila mogu se definisati sledeći otpori:

- otpori u sloju kajmaka (kajmak deluje kao membrana koja zaustavlja difuziju vlage);
- otpori usled viskoznosti vodene i masne faze;
- otpori usled konačne površine faze;
- otpori usled konačne debljine sloja mleka.

Na osnovu navedenih pogonskih sila i uočenih otpora mogu se oceniti osnovni uticajni parametri na tok procesa. U ovom radu vršena su ispitivanja samo termodinamičkih uticajnih parametara:

- temperatura mleka,
- temperatura vazduha,
- debljina sloja mleka,
- vreme trajanja procesa,
- brzina vazduha iznad sloja mleka.

### Osnove novog tehnološkog postupka

Proučavanje kinetike procesa izdvajanja kajmaka predstavlja doprinos upoznavaju tehnološkog postupka proizvodnje koji niz godina razvija Stević. Osnovu tehnološkog procesa izdvajanja čine operacije:

- izdvajanje kajmaka na povišenoj temperaturi,
- hlađenje mleka i izdvojenog kajmaka,
- separacija kajmaka od mleka.

Operacija izdvajanja kajmaka odvija se u zatvorenom sistemu i u kontrolisanoj atmosferi. U toku procesa izdvajanja kajmaka mleko se zagreva — održava na stalnoj temperaturi, a zagrejani vazduh prinudno struji preko njegove površine, odnoseći vlagu. Ovim se obezbeđuje kontrola svih uticajnih parametara u procesu, sterilnost izdvojenog kajmaka, skraćivanje vremena izdvajanja i povećanje prinosa.

Operacija hlađenja se izvodi pomoću rashladne tečnosti koja hladi mleko i hladnog vazduha koji hladi površinu sa izdvojenim kajmakom. Brzim izvođenjem ove operacije, mleko i kajmak se rashlađuju na temperature na kojima je sprečen razvoj mikroorganizama, a mlečna mast je prevedena u stinjeno stanje.

Ovako termički pripremljen sistem omogućava uspešno izvođenje operacije mehaničke separacije kajmaka sa površine mleka.

### **Eksperimentalna ispitivanja**

#### **Aparatura**

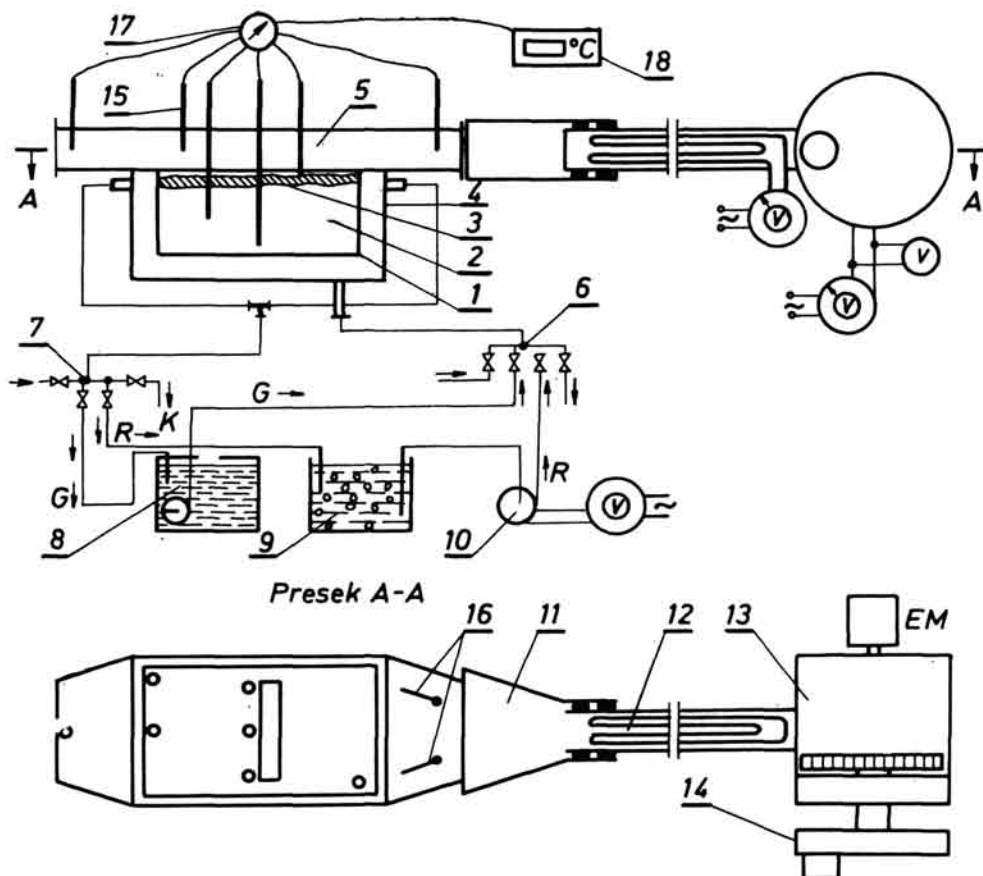
Na sl. 1. šematski je prikazana eksperimentalna aparatura. U sudu (1) od nerđajućeg čelika nalazi se mleko (2) na čijoj površini se formira sloj kajmaka (3). Oko suda (1) nalazi se drugi veći sud (4) a kroz međuprostor struji grejni ili rashladni fluid. Iznad pomenutih sudova nalazi se vazdušni kanal (5) snabdeven potrebnim otvorima: za prozor od pleksi stakla, za termoparove, pito cev i uzimanje uzoraka. Sud (1) je zamenljiv — postoji garnitura od tri suda, dubina 30, 60 i 90 mm, za eksperimente sa raznim debljinama sloja mleka.

Vazdušno kolo sastoji se iz sledećih elemenata: na ulazu je suvi filter (14), iza koga se nalazi ventilator (13) gonjen elektromotorom (EM) čiji se broj obrtaja reguliše promenom napona napajanja koji se meri na voltmtru (V). Vazduh iz ventilatora struji kroz cev sa grejačima (12) čija snaga također može da se menja promenom napona napajanja. Posle grejača, vazdušna struja ulazi u kanal iznad suda sa mlekom (5) pošto prođe kroz difuzor (11). U vazdušnom kanalu nalaze se krilca za usmeravanje struje (16) čiji je zadatak da zajedno sa difuzorom ujednače profil brzina u poprečnom preseku kanala.

Kroz dvostruke zidove suda (između 1 i 4) u toku procesa stvaranja kajmaka, struji topla voda iz termostata (8) koji je snabdeven pumpom pomoću koje se ostvaruje prinudna cirkulacija tople vode kroz vodove (G). Voda u dvostrukom sudu ulazi preko ulaznog čvora sa ventilima (6) kroz dno suda (4), deli se u dve struje koje opstrujavaju sud (1) sa svih strana i napušta dvostruki zid kroz dva otvora na bočnim stranama suda (4) i izlazni čvor (7).

Po završetku grejanja i izdvajanja kajmaka isključuje se kolo grejnog fluida. Na ulaznom i izlaznom čvoru zatvaraju se odgovarajući ventili, a kroz instalaciju se propušta voda iz vodovoda (ulazna — H, a izlazna odlazi u kanalizaciju — K). Pošto je ohlađena aparatura na neku srednju temperaturu (oko 30 °C) počinje cirkulacija rashladne vode (R). Ona struji kroz otvoreno kolo iz rezervoara (9) u koji se stalno dodaje led, preko pumpe (10), a zatim se, preko ulaznog čvora, dvostrukog suda i izlaznog čvora, vraća u rezervoar (9).

Merenje temperature ostvaruje se pomoću grupe termoparova (15) koja je preko razvodnika (17) povezana sa digitalnim instrumentom (18). Instrument je sa ugrađenom hladnom tačkom.



Slika 1. Šematski prikaz ogledne aparature

Sud (4), vazdušni kanal (5), difuzor (11) i cev sa grejačima vazduha (12) toplotno su izolovani slojem termoizolacionog materijala na bazi poliuretana, 2 cm debljine.

Za uspešno izvođenje eksperimenata neophodno je da se ispitivani termodinamički parametri procesa održavaju u željenim granicama i sa potrebnom tačnošću. Zbog toga je obavljeno baždarenje aparature i kalibrisanje merne opreme. U vazdušnom kanalu određeno je polje brzina (u pedeset tačaka, raspoređenih po pravougaonoj mreži u poprečnom preseku kanala, počev od 1 mm iznad površine mleka), odakle je nađena srednja brzina vazduha, koja je korelirana sa protokom, merenim anemometrom na izlazu kanala. Polje temperatura određivano je merenjem trenutnih temperatura u 7 tačaka, od kojih je 4 bilo raspoređeno u mleku (uz površinu, sredina sloja i dno suda) a tri u vazdušnom kanalu (ulaz vazduha, sredina suda, izlaz vazduha, sve u osi kanala). Prethodno izvršeno baždarenje termoparova pokazalo je da je apsolutna greška merenja temperature manja od  $0,1^{\circ}\text{C}$ , što je omogućavalo praćenje malih gradijenata temperature u mleku.

## Plan eksperimnata, rezultati i diskusija

Za ispitivanje je korišćeno sveže izmuženo mleko dosta ujednačenog sastava: vlažnost — 87,5%, masnoća — 4,0%, proteini — 3,2%, ostale materije — 5,3%. U ovim ispitivanjima nije bilo mogućnosti za analizu sadržaja laktoze, mada njen značaj u procesu izdvajanja kajmaka nije zanemarljiv.

Eksperimentima je ispitivan uticaj svakog od pet ranije pomenutih uticajnih faktora. Rađeno je sa po tri vrednosti svakog od parametara, pri čemu je u toku jedne serije ispitivanja jedan parametar variran, ostali su imali konstantnu vrednost. Ispitivanje kinetike procesa izdvajanja kajmaka vršeno je nedestruktivnom metodom, tako što je proces zaustavljen posle isteka željenog vremena.

Varirani parametri procesa bili su:

- temperatura mleka — 70, 80, 90 °C,
- temperatura vazduha — 60, 70, 80 °C,
- debljina sloja mleka — 30, 60, 90 mm,
- brzina vazduha — 0,5; 1,0; 1,5 m/s
- vreme trajanja eksperimenta — 2, 4, 6 časova.

Tokom eksperimenata merene su sledeće veličine:

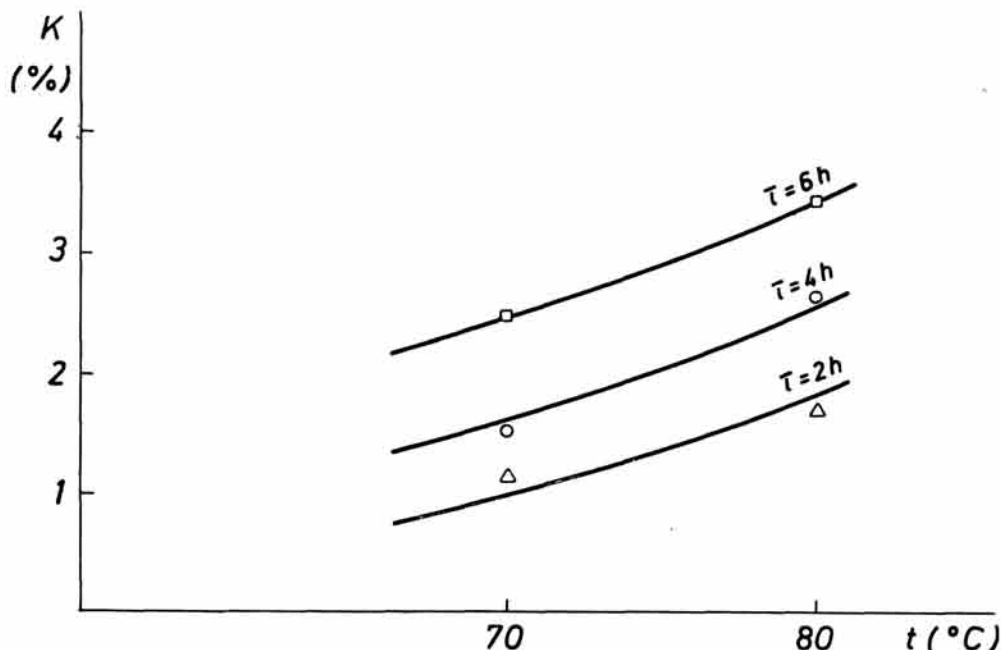
- masa: ulivenog mleka, kajmaka i obranog mleka,
- vlažnost: ulivenog mleka, kajmaka i obranog mleka,
- temperatura: mleka (dno, sredina, površina) i vazduha (ulaz, sredina, izlaz),
- sadržaj masti: mleka, kajmaka i obranog mleka.

Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 1. Na osnovu njih, uočene su zakonitosti odvijanja procesa prikazane su na sl. 2—5.

**Tabela 1.**

Eksperiment*	Prinos kajmaka %	Sastav kajmaka, %		
		Vode	Masti	Proteini
3.2.10.80.	3,19	38,00	54,60	7,10
3.4.10.80.	5,09	37,96	46,98	7,40
3.6.10.80.	6,87	39,51	45,06	8,03
6.2.10.80.	1,79	41,55	46,97	7,10
6.4.10.80.	2,66	38,21	44,51	8,20
6.6.10.80.	4,30	34,95	47,31	5,20
9.2.10.80.	1,68	38,57	44,91	8,21
9.4.10.80.	2,65	38,38	44,48	6,14
9.6.10.80.	3,43	41,77	43,33	6,92
9.2.10.70.	1,15	37,99	48,17	6,10
9.4.10.70.	1,53	38,58	49,51	6,32
9.6.10.70.	2,50	38,31	48,03	6,41
9.4.05.80.	2,52	37,55	44,94	7,11
9.4.15.80.	3,17	45,46	45,09	7,82
9.6.10.60/90.	4,43	38,68	45,76	—
9.4.10.60/80.	3,23	38,61	46,84	6,81
9.4.10.80/60.	1,58	38,67	51,77	5,32

\* Oznaka eksperimenta definiše eksperimentalne uslove, sledećim redom: debljina sloja mleka, cm; trajanje eksperimenta, čas; brzina vazduha, dm/s; temperatura mleka, C; temperatura vazduha, C. Ako su temperature mleka i vazduha jednake one odgovaraju poslednjoj brojnoj oznaci.



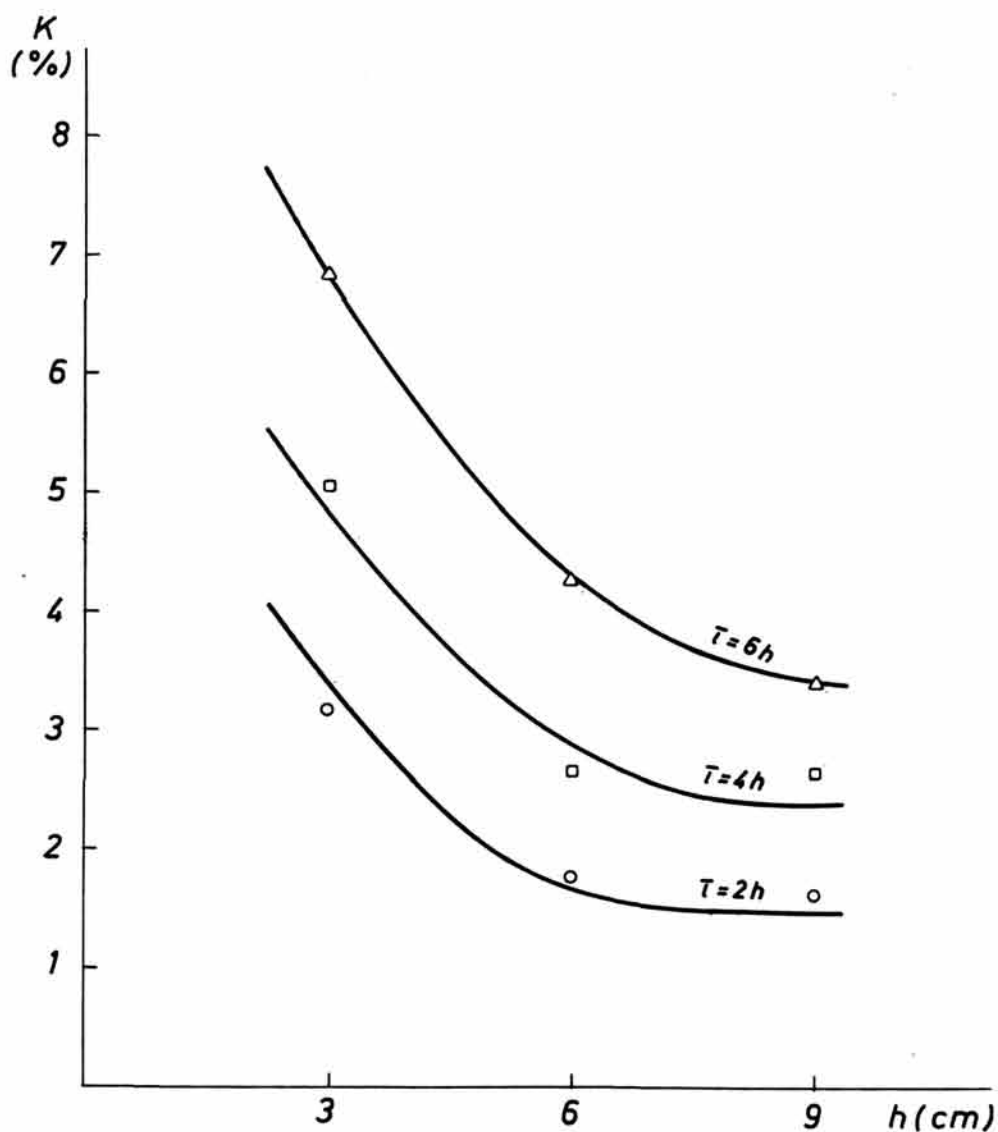
Slika 2. Zavisnost prinosa kajmaka od temperature

Dijagram na slici 2 prikazuje zavisnost prinosa kajmaka od temperature (ostali uslovi: sloj mleka — 9 cm, vreme izdvajanja 2, 4 i 6 časa, temperature vazduha i mleka su jednake, brzina vazduha — 1,0 m/s). Na dijagramu na slici 3 prikazan je uticaj debljine sloja razlivenog mleka na prinos kajmaka (ostali uslovi: temperatura mleka i vazduha — 80 °C, brzina vazduha 1,0 m/s). Dijagram na slici 4 je inverzan u odnosu na dijagram sa slike 3, ilustruje kinetiku izdvajanja kajmaka za različite debljine sloja mleka. Uticaj brzine vazduha na prinos kajmaka dat je na dijagramu prikazanom na slici 5, (ostali uslovi: debljina sloja mleka — 9 cm, temperatura mleka i vazduha — 80 °C, vreme izdvajanja — 4 h).

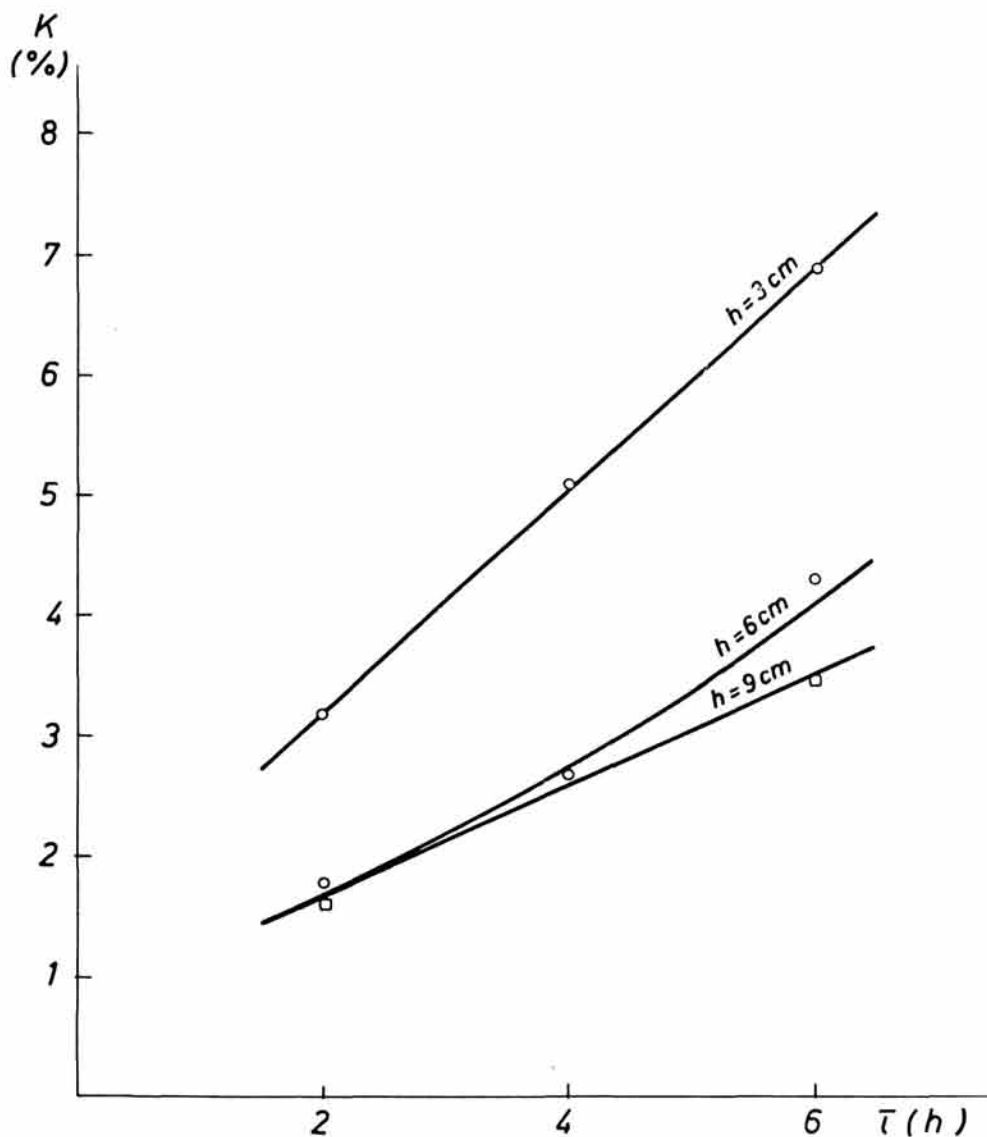
Prinosi kajmaka su veoma dobri, pogotovu kada se u obzir uzme višestruko skraćenje vremena izdvajanja u odnosu na tradicionalni postupak proizvodnje. Maksimalan prinos postignut je pri sledećim uslovima: temperatura mleka i vazduha 80 °C, brzina vazduha 1,0 m/s, debljina sloja mleka — 30 mm, vreme izdvajanja — 6 časova. Dobijeno je 6,87% kajmaka (po vlažnoj osnovi), što je za oko 70% veća količina u odnosu na prosečan prinos u seoskim domaćinstvima.

Pri analizi uzoraka kajmaka uočena je interesantna činjenica da su uzorci bili veoma slični po sastavu (tabela 1), iako su prinosi varirali u veoma širokim granicama (1,15% do 6,87%). Ovo ukazuje na usku povezanost izdvajanja masti i proteina, sa procesom isparavanja vlage. Nameće se zaključak da su uzorci izdvojenog kajmaka bili jako slični po mikrostrukturi, bez obzira pri kojim uslovima su se izdvajali.

Učinjen je pokušaj izračunavanja količine izdvojene masti primenom modela iz literature (5), koji opisuje proces izdvajanja belančevina i isplivanja masnih kapljica iz heterogenog sistema, ali su dobijeni rezultati za više desetina procenata veći od izmerenih vrednosti. Bez detaljnijih mikrostrukturnih ispitivanja ovog procesa teško je razviti pouzdane matematičke modele koji bi opisali proces izdvajanja kajmaka.



Slika 3. Zavisnost prinosa kajmaka od debljine sloja razlivenog mleka

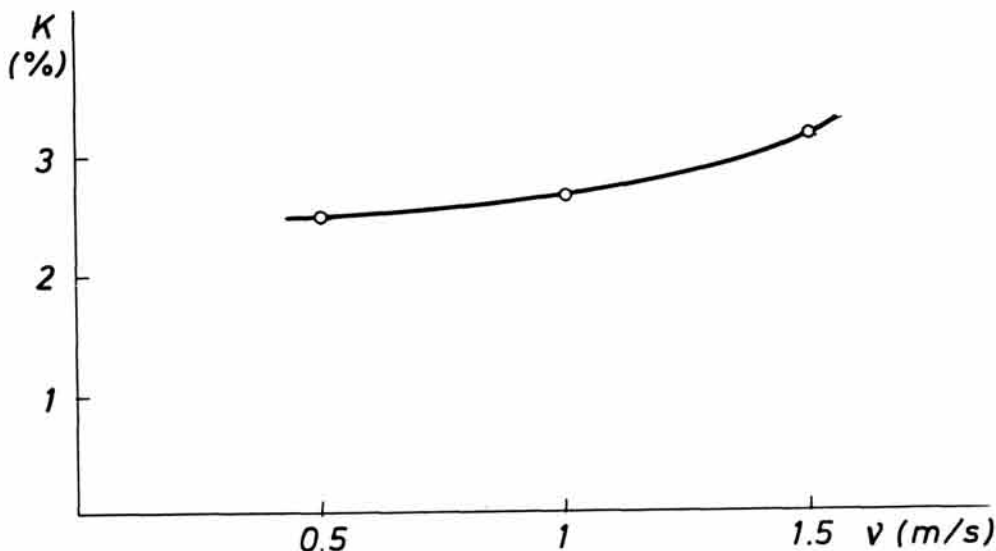


Slika 4. Kinetika izdvajanja kajmaka za slojeve mleka različite debljine

#### Zaključak

Na osnovu ovih početnih eksperimentalnih ispitivanja procesa izdvajanja kajmaka mogu se doneti određeni zaključci, važni kako za dalja ispitivanja, tako i za razmatranje konstrukcije aparata za industrijsku proizvodnju kajmaka.





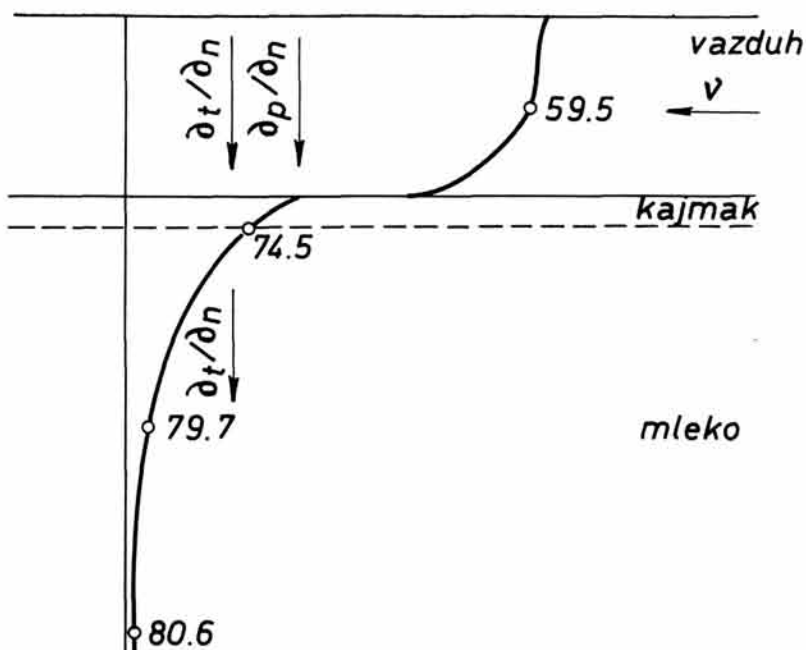
Slika 5. Zavisnost prinosa kajmaka od brzine strujanja zagrejanog vazduha

1. Opisani proces izdvajanja kajmaka omogućuje sterilnost finalnog proizvoda, pošto se ceo sistem za vreme izdvajanja nalazi na temperaturi oko  $80^{\circ}\text{C}$ , u periodu od više sati, što je dovoljno za uništavanje svih patogenih mikroorganizama koji se u mleku mogu naći. Separacija — skidanje kajmaka obavlja se sa prinudno ohlađenog mleka, na temperaturama bliskim nuli, što je takođe odgovaralo uslovima nepovoljnim za razvoj mikroorganizama. Po skidanju, kajmak se može zasejati pogodnom monokulturom acidofilnih mikroorganizama, čime se postiže kontrolisano vrenje, i definisan kvalitet sazrelog kajmaka.

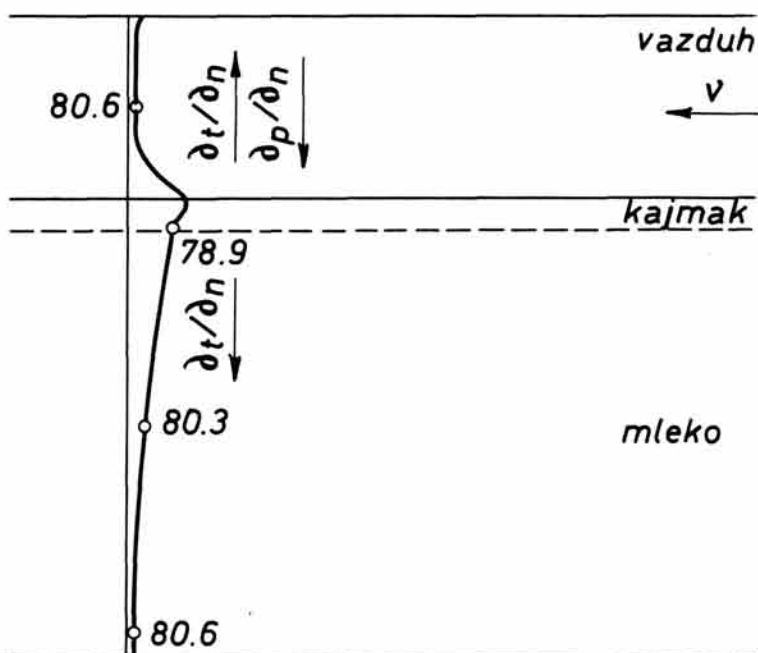
2. Opravdana je primena prinudnog strujanja vazduha jer se na taj način višestruko pospešuje proces razmene mase, ali se velikim brzinama (preko  $1\text{ m/s}$ ) vazduha ne postiže bitan efekat u povećanju prinosa, pošto se glavni otpori transportu mase nalaze u samoj opni kajmaka.

3. Debljina sloja mleka i temperatura mleka i vazduha imaju ključni uticaj na kinetiku izdvajanja. Pri tome je zapaženo da je bitan i smer gradijenata temperatura, odnosno, da se bolji prinos postiže kada je temperatura vazduha niža od temperature mleka, nego kada su ove jednake. U ovom slučaju u proučavanom dvofaznom sistemu gradijenti temperature i koncentracije vlage imaju isti smer što doprinosi efikasnijem izvođenju procesa (sl. 6). Maksimalna temperatura mleka ne sme biti viša od  $90^{\circ}\text{C}$  (za višecasovni proces), jer su pri toj temperaturi uočene bitne promene kvaliteta mleka i kajmaka: javila se smeđa boja i miris zagorelog mleka.

4. Postignuta efikasnost izdvajanja kajmaka tokom ove serije ispitivanja je sasvim zadovoljavajuća. Posmatranjem izdvajanja mlečne masti, kao faktora koji za mleko sa normalnim sadržajem masti ( $4\%$ ), prvi limitira moguća poboljšanja prinosa kajmaka, može se reći da je maksimalna postignuta efikasnost



*Ekspieriment 9.4.10.60/80*



*Ekspieriment 9.4.10.80*

Slika 6. Raspodela temperatura duž vertikalne ose aparata — dva odabrana eksperimenta

izdvajanja oko 77% (uz zadovoljavajući sadržaj masti u kajmaku od 45%). Ova ocena daje se na osnovu prinosa kajmaka od 6,87%, pri čemu je 77,36% mlečne masti izdvojeno u kajmak. Ovaj podatak je uslovan (zavisi pre svega od početne masnoće mleka), ali jasno ukazuje da je u pitanju proces sa veoma efikasnim izdvajanjem.

5. I pored visoke postignute efikasnosti, moguća su dalja poboljšanja i to u sledećim pravcima:

— smanjenjem temperature vazduha u odnosu na temperaturu mleka (na osnovu analize uticaja gradijenata temperatura),

— određivanjem maksimalne temperature mleka (u intervalu 80--90 °C), ili optimalne krive promene temperatura,

— smanjenjem debljine sloja ili ispitivanjem izdvajanja kajmaka u elementarnom sloju),

— povećanjem masnoće polaznog mleka, upotrebom izvorno masnijeg mleka, odnosno dodavanjem pavlake mleku, ali uz prethodnu ekonomsku analizu opravdanosti ovog postupka.

### Summary

#### Kinetics of kaymak separation

— Basic concept for a new production process —

*Kinetics of kaymak separation was studied on a laboratory scale experimental equipment. Obtained results were used for developing a new kaymak production process.*

*During the kaymak separation, the bulk of milk was heated using a hot water heat exchanger. Drying of the kaymak layer, separated on the milk surface, was performed by hot airflow. Kaymak yield was analysed as a function of the following parameters: depth of the initial milk layer, temperature gradients in the bulk of milk as well as in the air over the milk surface, and the rate of airflow.*

*Obtained experimental results have shown that the rate of the kaymak separation can be significantly increased by selecting the appropriate working parameters.*

### Literatura

1. GUTEHY, Lj.: Kajmak — *Le Lait*, 62, 1927 (po Steviću)
2. STEVIĆ, B.: Kajmak — Iproz, Beograd, 1942.
3. STEVIĆ, B.: Prilog poznavanju mikroflore kajmaka — Godišnjak Poljoprivrednog fakulteta, Beograd, 1949.
4. STEVIĆ, B.: Tehnološka mikrobiologija stočnih proizvoda i ishrane stoke — Naučna knjiga, Beograd, 1962.
5. ZONJI, DJ.: Neka razmatranja u vezi kajmaka — *Mljekarstvo*, 9, 77 (i neobjavljeni nastavak teksta).
6. MILJKOVIĆ, V.: Higijena i tehnologija mleka — Naučna knjiga, Beograd, 1977.

### Spisak korišćenih simbola

- K — prinos kajmaka u tež. % izračunat u odnosu na početnu količinu mleka;  
t — temperatura u |°C|  
h — visina sloja razlivenog mleka |cm|  
τ — vreme izdvajanja kajmaka u |h|  
v — brzina strujanja vazduha u |m/sec|  
∂t/∂u — gradijent temperature  
∂p/∂u — gradijent koncentracije definisan pomoću parcijalnog pritiska vodene pare.