UO‘K: 66.047-912

10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.4

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

MAVHUM QAYNASH QATLAMLI QURITISH QURILMASINI MODELLASHTIRISH VA OPTIMALLASHTIRISH





Muxitdinov Djalolitdin Paxritdinovich

Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O‘zbekiston
ORCID ID: 0000-0002-4984-2300

To‘xtamishova Madina Sherali qizi

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, O‘zbekiston
E-mail: madinatuxtamishova91@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-2317-9540
Science ID: MNV-0926-0209

Annotatsiya. *Ushbu maqolada mavhum qaynash qatlamli quritish qurilmasining matematik modeli ishlab chiqilgan va quritish jarayonining asosiy texnologik parametrlarining ta’siri tahlil qilingan. Modelda gaz va qattiq fazalar o‘rtasidagi gidrodinamik, issiqlik va massa almashinuvi jarayonlari, namlik hamda energiya balanslari hisobga olingan. Minimal mavhumlanish tezligini aniqlashda Archimedes va Reynolds sonlaridan foydalanilgan. Hisoblash natijalariga ko‘ra, minimal mavhumlanish tezligi 0,86 m/s, ishchi gaz tezligi 1,20 m/s deb belgilangan. Quritish temperaturasi va gaz tezligining ortishi quritish jarayonini jadallashtirishi aniqlangan. Matematik model yordamida materialning yakuniy namligi, quritish tezligi va davomiyligini baholash hamda optimal texnologik rejimni tanlash imkoniyati asoslangan.*

Kalit so‘zlar: *mavhum qaynash qatlami, quritish, matematik model, issiqlik almashinuvi, massa almashinuvi, optimallashtirish.*

Received: 25.09.2026 | Accepted: 01.09.2026 | Issue publication: 10.10.2026

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СУШИЛЬНОГО АППАРАТА С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Мухитдинов Джалолитдин Пахритдинович

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

Тухтамишова Мадина Шерали кизи

Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, Узбекистан

Аннотация. *В статье разработана математическая модель сушильного аппарата с кипящим слоем и проведён анализ влияния основных технологических параметров на процесс сушки. В модели учитываются гидродинамические процессы, тепло- и массообмен между газовой и твёрдой фазами, а также материальный и энергетический балансы. Для определения минимальной скорости псевдоожижения использованы числа Архимеда и Рейнольдса. По результатам расчётов минимальная скорость псевдоожижения составила 0,86 м/с, а рабочая скорость газа принята равной 1,20 м/с. Установлено, что повышение температуры и скорости газа интенсифицирует процесс сушки. Математическая модель позволяет оценивать конечную влажность материала, скорость и продолжительность сушки, а также обосновывать оптимальный технологический режим процесса.*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

Ключевые слова: *кипящий слой, сушка, математическая модель, теплообмен, массообмен, оптимизация.*

MODELING AND OPTIMIZATION OF A FLUIDIZED BED DRYING APPARATUS

Muxitdinov Djalolitdin Paxritdinovich
Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

Tokhtamishova Madina Sherali kizi
Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi, Uzbekistan

Abstract. *This paper presents a mathematical model of a fluidized bed drying apparatus and analyzes the effects of the main technological parameters on the drying process. The model considers hydrodynamic conditions, heat and mass transfer between the gas and solid phases, as well as mass and energy balances. The Archimedes and Reynolds numbers were used to determine the minimum fluidization velocity. According to the calculation results, the minimum fluidization velocity was 0.86 m/s, while the operating gas velocity was set at 1.20 m/s. The results indicate that increasing the gas temperature and velocity intensifies the drying process. The developed mathematical model makes it possible to evaluate the final moisture content, drying rate, and drying time, and to justify an optimal technological operating regime.*
Keywords: *fluidized bed, drying, mathematical model, heat transfer, mass transfer, optimization.*

Kirish. Mavhum qaynash qatlamli quritish qurilmalari kimyo, oziq-ovqat, farmatsevtika, mineral o‘g‘itlar va boshqa sanoat tarmoqlarida nam materiallarni samarali quritish uchun keng qo‘llaniladi. Qurilmada gaz oqimining pastdan yuqoriga yo‘nalishi natijasida qattiq zarrachalar muallaq holatga kelib, mavhum qaynash qatlami hosil qiladi. Buning natijasida gaz va qattiq fazalar orasidagi kontakt yuzasi ortib, issiqlik va massa almashinuvi jadallashadi. Quritish samaradorligi gaz temperaturasi va tezligi, zarracha diametri va zichligi, materialning boshlang‘ich namligi, qatlam balandligi hamda quritish davomiyligi kabi parametrlarning o‘zaro ta’siriga bog‘liq. Ayniqsa, zarrachalarning muallaq holatga o‘tishini ta’minlovchi minimal mavhumlanish tezligini aniqlash jarayonning barqaror kechishida muhim ahamiyatga ega [1].

Quritish jarayonlarini tajriba asosida tadqiq etish ko‘p vaqt va energiya talab qilishi sababli matematik modellashtirish samarali yondashuvlardan biri hisoblanadi. Matematik model yordamida qurilmaning turli ish rejimlarini baholash, material namligi va temperaturaning vaqt bo‘yicha o‘zgarishini aniqlash, quritish tezligini hisoblash hamda texnologik parametrlarning jarayon samaradorligiga ta’sirini tahlil qilish mumkin [5-7]. Bunda gidrodinamik shartlar, massa va energiya balanslari, shuningdek, issiqlik va massa almashinuvi jarayonlari o‘zaro bog‘liq holda ko‘rib chiqiladi. Jarayonni optimallashtirishda esa quritish harorati, gaz tezligi va quritish davomiyligini maqbul tanlash orqali talab etilgan yakuniy namlikka erishish, quritish vaqtini va energiya sarfini kamaytirish ko‘zda tutiladi.

Mavhum qaynash qatlamli quritish ammiakli selitra granulalarini quritishda ham muhim texnologik jarayonlardan biri bo‘lib, mahsulot tarkibidagi ortiqcha namlik granulalarning yopishishi, qotishi va saqlashdagi sifat ko‘rsatkichlarining pasayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli quritish jarayonida temperatura, gaz oqimi tezligi va qatlam parametrlarini maqbul qiymatlarda boshqarish muhimdir. Ushbu tadqiqotning maqsadi mavhum qaynash qatlamli quritish qurilmasining matematik modelini ishlab chiqish, asosiy texnologik parametrlarning jarayonga ta’sirini aniqlash va materialning talab etilgan namlik darajasiga erishish hamda energiya sarfini kamaytirishga yo‘naltirilgan optimal ish rejimini asoslashdan iborat. Tadqiqotda minimal mavhumlanish tezligi, material namligining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi, quritish tezligi, gaz va zarracha temperaturalarining o‘zgarishi hamda issiqlik va massa almashinuvi jarayonlari o‘zaro bog‘liq holda tahlil qilinadi.

Tadqiqot metadologiyasi. Mavhum qaynash qatlamli quritish jarayonini matematik

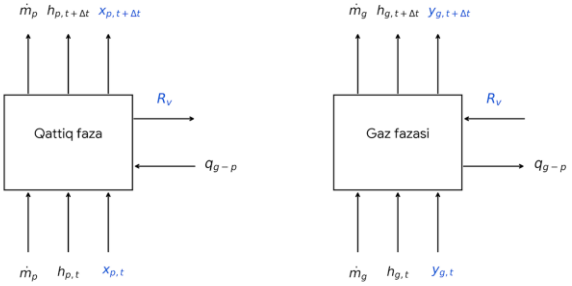
modellashtirishda gaz oqimi va qattiq zarrachalar o‘rtasidagi gidrodinamik, issiqlik va massa almashinuvi jarayonlari birgalikda qaraladi. Dastlab zarrachalarning mavhum qaynash holatiga o‘tishini ta’minlovchi minimal gaz tezligi aniqlanadi. Bunda Archimedes va Reynolds sonlaridan foydalaniladi:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (1)$$

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (2)$$

bu yerda d_p – zarracha diametri, ρ_p va ρ_g – zarracha va gaz zichliklari, μ_g - gazning dinamik qovushqoqligi, U_{mfu} – minimal mavhumlanish tezligi [6-11].

Quritish jarayonining matematik modelida qattiq va gaz fazalari alohida nazorat hajmlari sifatida qaralib, ular orasidagi massa va issiqlik almashinuvi hisobga olinadi. 1-rasmda qattiq va gaz fazalariga kiruvchi hamda chiquvchi massa oqimlari, entalpiya, namlik va fazalararo issiqlik almashinuvi oqimlarining sxematik ko‘rinishi keltirilgan.



1-rasm. Mavhum qaynash qatlamli quritish jarayonining gaz va qattiq fazalar uchun matematik modeli sxemasi.

Quritish jarayonida zarracha namligining o‘zgarishi umumiy holda massa balansi orqali ifodalanadi:

$$p\frac{dX}{dt} = -R \quad (3)$$

bu yerda X – material namligi, p – qattiq fazaning massasi, R – quritish tezligi. Quritish tezligi esa gaz va zarracha yuzasidagi namliklar farqiga bog‘liq:

$$\frac{\rho_g dY}{dt} = \dot{m}_g(Y_{in} - Y) + R \quad (4)$$

ko‘rinishida yoziladi. Bu tenglama gaz oqimiga materialdan bug‘langan namlikning qo‘shilishini ifodalaydi.

Quritish jarayonining issiqlik balansi gaz va zarracha o‘rtasidagi issiqlik almashinuvini hamda namlikni bug‘latish uchun sarflanadigan issiqlikni hisobga oladi:

$$g \cdot \frac{d(h_g + Yh_v)}{dt} = \dot{m}_g\left[\left(h_{g,\,in} + Y_{in}h_v\right) - \left(h_g + Yh_v\right)\right] - \alpha ap\left(T_g - T_p\right) + Rh_v \quad (5)$$

bu yerda T_g va T_p – gaz va zarracha haroratlari, α – issiqlik almashinish koeffitsiyenti, h_v — suv bug‘ining entalpiyasi.

Gaz va zarracha orasidagi issiqlik almashinish koeffitsiyenti Nusselt soni orqali aniqlanadi:

$$Nu = \frac{\alpha d_p}{\lambda^g}, \qquad \alpha = \frac{Nu\lambda^g}{d_p}$$

Massa almashinish koeffitsiyenti esa Sherwood soni bilan bog‘lanadi:

$$Sh = \frac{kd_p}{D_{AB}}, \qquad k = \frac{ShD_{AB}}{d_p}$$

Shunday qilib, quritish qurilmasining matematik modeli asosan gidrodinamik shartlar, namlik balansi, energiya balansi, issiqlik va massa almashinish tenglamalaridan tashkil topadi. Model yordamida gaz harorati T_g, gaz tezligi u_g, zarracha diametri d_p, boshlang‘ich namlik X_0 va quritish vaqti tt ning yakuniy namlik va quritish tezligiga ta’siri aniqlanadi. Ushbu yondashuv quritish jarayonining optimal texnologik rejimini tanlash uchun asos bo‘lib xizmat qiladi. Manbada bunday modellashtirish 0D, 1D va CFD usullari orqali amalga oshirilishi ko‘rsatilgan.

Natijalar va muhokama. Mavhum qaynash qatlamli quritish jarayonining matematik modeli gaz va qattiq zarrachalar o‘rtasidagi gidrodinamik, issiqlik va massa almashinuvi jarayonlarini hisobga olgan holda shakllantirildi. Model asosida mavhumlanishning minimal tezligi, material namligining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi, quritish tezligi hamda gaz va zarracha haroratlarining o‘zgarishi baholandi.

1-jadvalda quritish jarayonining matematik modelini hisoblashda foydalanilgan asosiy parametrlar va hisoblangan ko‘rsatkichlar keltirilgan. Hisoblash natijalariga ko‘ra, minimal mavhumlanish tezligi $u_m f$=0,86 m/s ni tashkil etadi, ishchi gaz tezligi esa 1,20 m/s qilib qabul qilingan. Demak, ishchi gaz tezligi minimal mavhumlanish tezligidan yuqori bo‘lib, zarrachalarning mavhum qaynash qatlamida muallaq holatda harakatlanishi uchun zarur sharoit ta’minlanadi [12].

Mavhum qaynash qatlamli quritish jarayonining matematik modeli asosida minimal

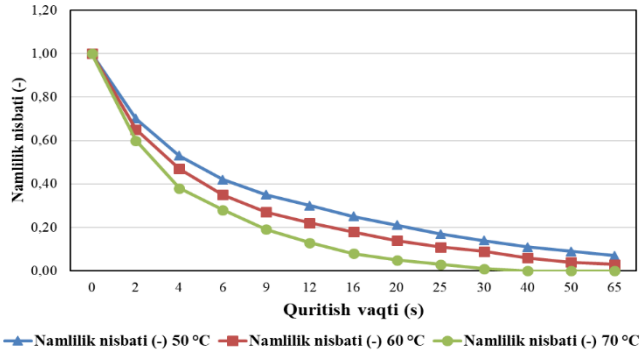
(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

mavhumlanish tezligi, material namligi, quritish tezligi hamda gaz va zarracha haroratlari baholandi. Natijalar zarracha o‘lchami, gaz tezligi va qatlam xususiyatlari quritish samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatdi. Gaz tezligi minimal mavhumlanish tezligidan yuqori bo‘lganda zarrachalarning barqaror muallaq holati ta’minlanib, issiqlik va massa almashinuvi jadallashadi.

1-jadval

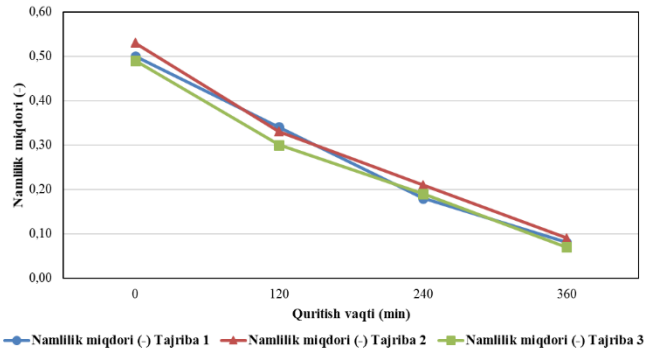
Quritish jarayonining asosiy hisoblangan parametrlari

№	Parametr nomi	Belgilan	O‘lchov birligi	Qiymati
1	Zarracha diametri	d_p	mm	2,0
2	Zarracha zichligi	ρ_p	kg/m^3	1700
3	Gaz zichligi (60 °C)	ρg	kg/m^3	1,06
4	Gazning dinamik qovushqoqligi (60 °C)	μg	Pa·s	$2{,}0\times10^{-5}$
5	Minimal mavhumlanish tezligi	u_mf	m/s	0,86
6	Gazning ishchi tezligi	ug	m/s	1,20
7	Boshlang‘ich namlik	X_0	kg/kg	0,50
8	Yakuniy namlik	Xf	kg/kg	0,08
9	Quritish vaqti	t	min	360
10	O‘rtacha quritish tezligi	$\bar{R}$	kg/(kg·min)	0,00117
11	Archimedes soni	Ar	–	$3{,}53\times10^5$
12	Minimal fluidizatsiya Reynolds soni	Re_mf	–	91,0



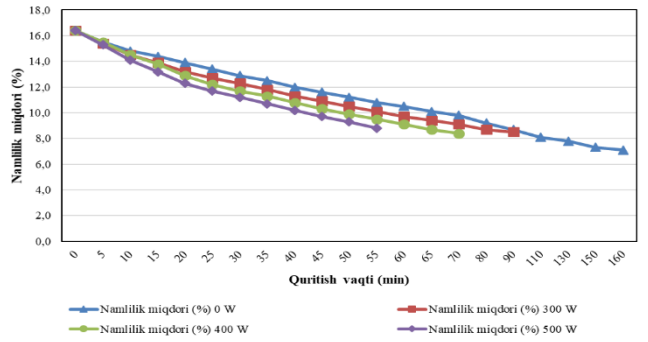
2-rasm. Quritish harorati va namlik nisbatining quritish vaqtiga bog‘liqligi.
(Manba: Sozzi va boshqalar).

2-rasmda quritish vaqtining ortishi bilan barcha haroratlarda namlik nisbati kamayishi ko‘rsatilgan. Harorat oshishi bilan quritish jarayoni jadallashib, 70 °C da namlik eng tez kamaygan, 50 °C da esa jarayon nisbatan sekin kechgan. Dastlab namlikning kamayish tezligi yuqori bo‘lib, keyinchalik pasaygan. Bu holat harorat oshishi natijasida issiqlik va massa almashinuvi hamda namlikning bug‘lanish tezligi ortishi bilan izohlanadi. Natijalar quritish harorati jarayonning muhim texnologik parametri ekanligini ko‘rsatadi.



3-rasm. Turli tajriba sharoitlarida namlik miqdorining quritish vaqtiga bog‘liqligi.
(Manba: Mohseni va boshqalar).

3-rasmda quritish vaqtining ortishi bilan barcha tajribalarda material namligi muntazam kamayishi kuzatilgan. Dastlabki 120 minutda namlikning kamayishi jadalroq kechgan, keyingi bosqichda esa jarayon sekinlashgan. 240 minutda namlik 0,18–0,21, 360 minutda esa 0,07–0,09 oralig‘ida bo‘lgan. Tajribalar orasidagi kichik farqlar quritish sharoitlari va materialning namlikni ajratish xususiyatlari bilan bog‘liq. Natijalar quritish vaqtining ortishi material namligining izchil kamayishiga olib kelishini ko‘rsatadi.



4-rasm. Turli mikroto‘lqin quvvatlarida material namligining quritish vaqtiga bog‘liqligi.
(Manba: Taheri va boshqalar).

Mikroto‘lqin quvvatining oshirilishi bilan quritish jarayonining jadallashishi 4-rasmda yaqqol kuzatiladi. 500 W quvvatda namlik eng tez kamayib, 55 minut atrofida eng past qiymatga erishgan, 400 W va 300 W quvvatlarda esa jarayon nisbatan sekinroq kechgan. Mikroto‘lqin quvvati qo‘llanilmagan holatda quritish eng uzoq davom etgan. Natijalar mikroto‘lqin quvvatining ortishi namlikning bug‘lanish jarayonini tezlashtirib,

quritish davomiyligini qisqartirishga yordam berishini ko‘rsatadi.

Quritish jarayonini optimallashtirishda qurituvchi gaz temperaturasi, oqim tezligi, boshlang‘ich namlik va quritish davomiyligining materialning yakuniy namligiga ta’siri hisobga olindi. Hisoblash natijalari temperatura va gaz tezligining ortishi issiqlik va massa almashinuvi jadallashib, quritish vaqtining qisqarishini ko‘rsatdi. Gaz tezligini minimal mavhumlanish tezligidan yuqori saqlash zarrachalarning barqaror muallaq holatini ta’minlaydi. Shu sababli optimal rejimni tanlashda quritish tezligi bilan bir qatorda energiya sarfi va materialning talab etilgan yakuniy namligi ham hisobga olinishi lozim.

Tahlil natijalariga ko‘ra, quritish jarayonining samarali rejimi materialni talab etilgan namlik darajasiga yetkazish, quritish davomiyligini kamaytirish va ortiqcha energiya sarfining oldini olish shartlari asosida belgilanadi. Matematik model orqali T_g, u_g, X_0 va t parametrlarining turli qiymatlari uchun yakuniy namlik va quritish tezligini baholash mumkin. Bunda gaz tezligi minimal mavhumlanish tezligidan yetarlicha yuqori, quritish temperaturasi esa material sifatiga salbiy ta’sir ko‘rsatmaydigan chegarada tanlanishi maqsadga muvofiq. Mazkur yondashuv mavhum qaynash qatlamli quritish qurilmasining ishlash rejimini asoslangan holda tanlash va energiya samaradorligini oshirish imkonini beradi.

Xulosa. Mavhum qaynash qatlamli quritish jarayonining gidrodinamik, issiqlik va massa almashinuvi jarayonlarini o‘zaro bog‘liq holda ifodalovchi matematik modeli ishlab chiqildi. Hisoblash natijalariga ko‘ra, minimal mavhumlanish tezligi 0,86 m/s, ishchi gaz tezligi esa 1,20 m/s ni tashkil etdi. Model yordamida material namligining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi, quritish tezligi hamda gaz va zarracha temperaturalarining dinamikasi baholandi. Gaz temperaturasi va tezligining ortishi issiqlik va massa almashinuvi jadallashishiga, natijada quritish davomiyligining qisqarishiga olib kelishi aniqlandi. Jarayonni optimallashtirishda gaz temperaturasi, oqim tezligi, boshlang‘ich namlik va quritish davomiyligining o‘zaro ta’siri hisobga olinib, materialning talab etilgan yakuniy namligiga erishish bilan birga energiya sarfini kamaytirish imkoniyati asoslandi. Mazkur matematik yondashuv mavhum qaynash qatlamli quritish qurilmasining optimal texnologik rejimini tanlash, jarayon barqarorligini ta’minlash va qurilmaning energiya samaradorligini oshirish uchun amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

[1] Nguyen, V. D., Nguyen, T. V. L., Nguyen, N. A., Kharaghani, A., & Le, K. H. (2026). Fluidized bed drying modeling: Impact of initial solid mass on drying kinetics. Chemie Ingenieur Technik, 98, 292–303. https://doi.org/10.1002/cite.70064

[2] Liu, T., Yin, Y., & He, D. (2026). Numerical simulation of pharmaceutical particle drying in a gas-solid fluidized bed using the CPFD method. Drying Technology, 44(2), 217–231. https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2608266

[3] Nadda, M., Banaeizadeh, A., Avilala, P., Roy, S., & Yadav, A. (2025). Coupled computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM) modeling of moisture removal in a fluidized bed dryer for heterogeneously coated solids. Chemical Engineering Science, 316, 121811. https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121811

[4] Chen, H., Yang, C., Miyazaki, T., Kim, Y.-D., Shahzad, M. W., & Thu, K. (2025). Mathematical modeling of fluidized bed drying system: Review and state of the art. Evergreen, 12(2), 1336–1368. https://doi.org/10.5109/7363513

[5] Yang, K., Li, X., Wang, Y., & Du, X. (2025). CFD-DEM simulation study on heat and mass transfer of wheat particles in gas-solid fluidized bed. Journal of Food Process Engineering, 48(1), e70036. https://doi.org/10.1111/jfpe.70036

[6] Zanone, A., Zamboni do Carmo, G., Ropke, M., Penteriche, M. R. D., Calciolari, R. M., & Andreola, K. (2025). Predicting moisture content in microcrystalline cellulose during fluidized bed drying using machine learning techniques. Journal of Food Process Engineering, 48(5), e70119. https://doi.org/10.1111/jfpe.70119

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

[7] Billah, M. T., Zannat, N. E., Hossain, M. A., Sachcha, I. H., Yasmin, S., & Sarker, M. S. H. (2025). Process optimization of fluidized bed drying for water spinach: Evaluating the effect of blanching through RSM and ANN models. Food Science & Nutrition, 13(4), e70114. https://doi.org/10.1002/fsn3.70114
[8] Touil, A., Gritli, S., & Taieb, A. (2025). Mathematical modeling of batch fluidized bed drying of alumina. American Journal of Mechanics and Applications, 12(1), 11–21. https://doi.org/10.11648/j.ajma.20251201.12
[9] de Munck, M. J. A., Peters, E. A. J. F., & Kuipers, J. A. M. (2024). CFD-DEM modeling and validation of solids drying in a gas-fluidized bed. Chemical Engineering Science, 291, 119922. https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.119922
[10] Jin, H., Wu, Q., Wang, S., & He, Y. (2024). Heat and mass transfer performance of non-spherical wet particles in a fluidized bed dryer. Applied Thermal Engineering, 236, 121780. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121780
[11] Simanjuntak, M. E., Sitorus, M. B. H., Kamila, I., & Ginting, B. B. (2024). Kinetic analysis and mathematical modeling of low-rank coal drying by using swirl fluidized bed dryer on varied angles of guide vane and temperatures. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 46(1), 3263–3277. https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2317435
[12] Ma, Z., Tu, Q., Liu, Z., Xu, Y., Ge, R., & Wang, H. (2023). CFD-DEM investigation of the gas-solid flow characteristics in a fluidized bed dryer. Chemical Engineering Research and Design, 196, 235–253. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.06.054
[13] Vandeputte, T., Ghijs, M., Van Hauwermeiren, D., Schultz, E. D. S., Schäfer, E., Stauffer, F., De Beer, T., & Nopens, I. (2023). Mechanistic modeling of semicontinuous fluidized bed drying of pharmaceutical granules by incorporating single particle and bulk drying kinetics. International Journal of Pharmaceutics, 646, 123447. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123447
[14] Hasibuan, R., Sari, W. N., Manurung, R., & Alexander, V. (2023). Drying kinetic models of rice applying fluidized bed dryer. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 10(1), 334–339. https://doi.org/10.18280/mmep.100138
[15] Tu, Q., Ma, Z., & Wang, H. (2023). Investigation of wet particle drying process in a fluidized bed dryer by CFD simulation and experimental measurement. Chemical Engineering Journal, 452, 139200. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139200

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Muxitdinov, D. P., & To‘xtamishova, M. S. (2026). Mavhum qaynash qatlamli quritish qurilmasini modellashtirish va optimallashtirish. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3-1). https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.4