

Байгалийн хөргөлтөөр чийг зайлуулах конденсатор бүхий агаарын битүү сэлгэлттэй дулааны хатаагуурт төмс хатаах процессын математик загвар, эрчим хүчний үр ашиг

Чулуун Мягмаржав*

Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, Бага тойруу, 8-р хороо, Сүхбаатар дүүрэг-14191, Улаанбаатар хот, Монгол улс

 <https://orcid.org/0000-0002-8954-5183>

*Холбоо баригч зохиогч: myagmarjavchuluun@gmail.com

Хүлээн авсан: 03.09.2022

Хянасан: 15.12.2022

Хэвлэлтэд орсон: 30.12.2022

Хураангуй

Энэ өгүүлэлд агаарын битүү сэлгэлттэй хатаах аргаар төмс хатаасан туршилтын үр дүнг үзүүлээ. Агаарын битүү сэлгэлттэй хатаах процесст агаарыг хөргөж чийг зайлуулахын тулд байгалийн хүйтэн агаарыг ашигласан. Чийгээ алдаж хөрсөн агаарыг цахилгаан халаагуураар халаана. Төмс хүнсний ногоо нь хүн амын хоол тэжээлийн гол түүхий эд бөгөөд төмс нь дэлхийн хүн амын хоол тэжээлийн дөрөв дэх чухал хүнс юм [1]. Хальсыг арилгаж цэвэрлэсэн шоо хэлбэртэй төмсийг (5×5×5 мм) урьдчилсан боловсруулалт хийлгүйгээр хатаах туршилтыг хийсэн. Эхлээд төмсийг 1м/с агаарын урсгалын хурдтай, 42, 56, 65°C температуртай агаараар хатааж судлаачдын тодорхойлсон хатаах процессын математик загваруудаас хамгийн тохиромжтой загварыг тодорхойлсон. Математик загваруудаас хамгийн тохиромжтой нь Wang and Singh, Midilli нарын загвар байлаа. Дараагийн туршилтаар конденсаторт гаднаас өгөх байгалийн агаарын температур ба агаарын зарцуулалтыг туршилт төлөвлөлтийн аргаар төлөвлөж Wang and Singh загварын коэффициентүүдэн утгын регрессийн загвар болон эрчим хүчний зарцуулалтын үр ашгийг тодорхойллоо. SMER-ийн утга 0.24132-0.26624 кг/(кВт ц) завсарт хэлбэлзэж байна.

Түлхүүр үг: дулааны насос, нам температурын хатаалт, SMER, хатаалтын загвар

Оршил

Дэлхийн хүн амын өсөлттэй холбоотойгоор жимс жимсгэнэ, хүнсний ногоо, хөдөө аж ахуйн бусад бүтээгдэхүүний эрэлт хэрэгцээ тасралтгүй нэмэгдэж байна. Эдгээр бүтээгдэхүүний хэрэглээ, хүртээмж, газар орны байрлал, цаг уурын нөхцөл байдлаас хамаарч хамгийн бага зардлаар хадгалах болон тээвэрлэх шаардлага байнга гардаг. Хатаах арга нь хөдөө аж ахуйн бүтээгдэхүүний чанарыг удаан хугацаанд хадгалах хамгийн энгийн бөгөөд хэмнэлттэй арга юм. Хатаасан бүтээгдэхүүн нь тээвэрлэхэд жин багатай, удаан хугацаагаар хадгалах боломжийг олгодог [2]. Хатаах процесст хүрээлэн буй орчны нөлөөллийг багасгах (агаарын бохирдол, агаарын чийглэг), хатаах шүүгээнд өгөх агаарын температур чийглэгийг хянах, температур ба чийглэгт мэдрэмтгий бүтээгдэхүүнийг хатаах, эрчим хүчний үр ашгийг дээшлүүлэх

зорилгоор дулааны насостой хатаалтыг хэрэглэж байна. Дулааны насостой хатаалтын чийгийг зайлуулах хурд нь бусад хатаах аргуудтай харьцуулахад илүү сайн, мөн эрчим хүчний хувийн зарцуулалт бага байдаг [3]. Энэ судалгааны ажилдаа дулааны насосын ууршуулагчийг байгалийн хөргөлтөөр, харин конденсаторыг нь халаагч элементээр орлуулан агаарын битүү сэлгэлтээр хүнсний бүтээгдэхүүнийг хатаах туршилтыг хийлээ. Дулааны насос болон байгалийн агаарын хөргөлттэй хатаах процессын схемийг 1-р зурагт харууллаа. Бүтээгдэхүүнээс ялгарсан чийгийг байгалийн хөргөлтөөр шингэрүүлэн зайлуулах аргаар хатаалт явуулсан судалгааны ажил олдоогүй.

Материал, арга зүй

Шинэ төмсийг E-mart сүлжээ дэлгүүрээс худалдан авч, хөргөгчийн $5 \pm 1^\circ\text{C}$ температурт хадгалан, туршилт хийсэн. Төмсний анхны чийгийн агууламжийг зууханд хатаах аргаар тодорхойлсон. 100 г дээжийг $105 \pm 2^\circ\text{C}$

температуртай хатаах шүүгээнд 6 цагийн турш хатаана. Туршилтыг гурван давталтаар явуулж хэмжилт хийсэн.

2.1 Түүхий эд

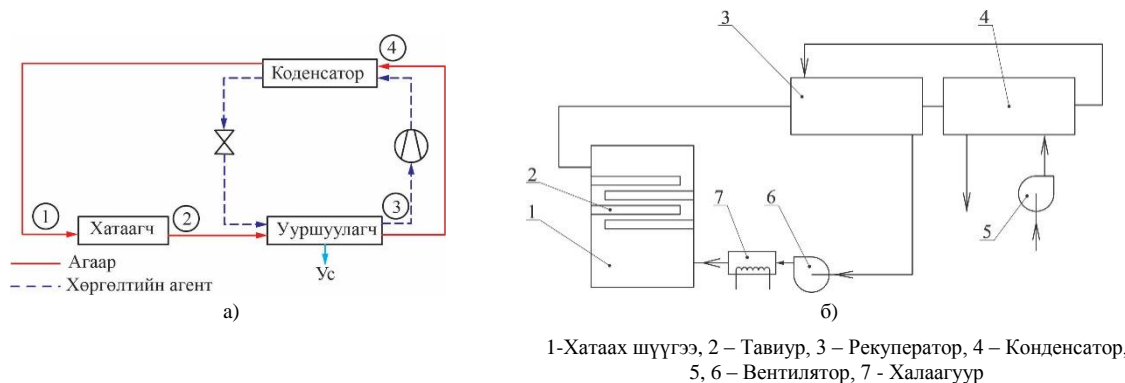


Figure 1. Schematic diagram of closed air circulation dryer
 a– schematic diagram of the heat pump drying system,
 b – schematic diagram of the natural cooling dryer

2.2 Туршилтын төхөөрөмж

Туршилтад зориулан лабораторийн туршилтын төхөөрөмжийг өөрөө зохион бүтээсэн (2-р зураг). Туршилт явуулах төхөөрөмж нь хатаах камер, конденсатор, калорифер, удирдлагын самбар гэсэн үндсэн хэсгүүдээс бүрдэнэ. Хатаах шүүгээг 0.5мм зузаантай зэвэрдэггүй ган хуудсан төмрөөр хийсэн. Шүүгээг 20мм зузаан дулаан тусгаарлагч материалаар доторлож мөнгөлөг цаасаар бүрсэн. Бүтээгдэхүүн байрлуулах 4 тавиуртай бөгөөд эдгээр нь шүүгээний хананаас хөндий байрлаж жингийн мэдрэгчээс дүүжлэгдэнэ. Төхөөрөмжийн агаар оруулах хэсэг дээр цахилгаан халаагуур байрлуулан тэнхлэгийн вентилятороор

агаарын битүү сэлгэлт хийнэ. Хатаах шүүгээнээс гарах агаар нь халуун болон хүйтэн агаарын хооронд дулаан солилцоо хийх рекуператор, агаараас чийг ялгах конденсатораар дамжин буцаад хатаах шүүгээний агаар оруулах хэсэгт очно. Ялгарсан усыг нарийн гуурсан хоолойгоор байнга зайлуулна. Хатаах агаарын температур, ууршсан чийгийн хэмжээ, агаарын температур болон харьцангуй чийглэгийг удирдлагын самбарт байрлах хяналтын төхөөрөмжөөр SD картад 5 минут тутам бичиж хадгална. Мөн хатаах агаарын температур, агаарын урсгалын хурдыг удирдлагын төхөөрөмжөөр тохируулна.

2.3 Туршилтын явуулах аргазүй

Хатаах шүүгээнд өгөх агаарын урсгалын хурд 1м/с байх үед бүх туршилтыг хийсэн. Эхлээд хатаах процессын загваруудаас хамгийн сайн тохирч байгаа загварыг тодорхойлох зорилгоор хатаах агаарын температур 42, 56, 65°C байх үед төмсийг хатаасан. Хатаах загварыг тодорхойлсны дараа хатаах температурын хамгийн сайн үр дүн үзүүлсэн утгад хатаах процессын математик загварын коэффициентүүдын

регрессийн тэгшитгэлийг гаднаас өгөх хүйтэн агаарын температур ба зарцуулалтаар илэрхийлэхийн тулд Central Composite Design аргаар төлөвлөж туршилт явуулсан (1-р хүснэгт). Математик загварын коэффициентүүдыг Matlab программ ашиглан тодорхойлж, туршилт төлөвлөлтийн математик боловсруулалтыг JMP pro16 программ ашиглан хийлээ.

2.4 Нимгэн үеэр хатаах загварууд

Чийглэг [4].

$$W = \frac{m_w}{m_d + m_w} \quad (1)$$

Чийг агууламж (абсолют чийглэг) [4].

$$M = \frac{m_w}{m_d} \quad (2)$$

Энд, m_w , m_d – харгалзан бүтээгдэхүүнд агуулагдах чийгийн хэмжээ ба хатуу хуурай массын хэмжээ, кг

Table 1.

Planning matrix		
	V, м3/с	T, °C
1	0.00785	-20
2	0.01570	-20
3	0.00785	-10
4	0.01570	-10
5	0.011775	-15
6	0.011775	-15
7	0.011775	-20
8	0.011775	-10
9	0.00785	-15
10	0.01570	-15



Figure 2. View of the experimental arrangements

Чийглэг ба чийг агууламжийн хоорондын хамаарал [4].

$$M = \frac{W}{1-W} \quad (3)$$

Харьцангуй чийглэг [3].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (4)$$

Энд, M_t – хугацааны тухайн эгшний чийг агууламж (кг чийг/кг х.мат); M_o, M_e – анхны болон тэнцвэрийн чийг агууламж (кг чийг/кг х.мат).

Хатаалтын хурд

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \tag{5}$$

Энд, M_{t+dt} - $t+dt$ хугацааны өсөлтөд харгалзах чийгийн агууламж (кг чийг/кг х.мат); t - хугацаа (мин). Судлаачдын

боловсруулсан төмс, хүнсний бүтээгдэхүүн хатаах процессын хамгийн их хэрэглэгддэг туршилтын математик загваруудыг 2-р хүснэгтээр харууллаа.

Table 2.

List of empirical models

Нэр	Загварын тэгшитгэл	Эшлэл
1 Lewis	$mr = \exp(-kt)$	[1]
2 Page	$mr = \exp(-kt^n)$	[2]
3 Modify Page	$mr = \exp(-(kt)^n)$	[3]
4 Wang & Singh	$mr = 1 + at + bt^2$	[4]
5 Logaritmik	$mr = a_0 + a \exp(-kt)$	[5]
6 Two Term exponential	$mr = a \exp(kt) + (1 - a)\exp(-kax)$	[7]
7 Two Term	$mr = a_1 \exp(-k_1t) + a_2 \exp(-k_2t)$	[6]
8 Midilli нарын	$mr = a \exp(-kt^n) + bt$	[8]

2.5 Цахилгаан эрчим хүчний үр ашиг

Хатаах процессыг 1-р зурагт үзүүлсэн схемээр явуулсан. Цахилгаан эрчим хүч зарцуулах тоноглол нь хатаах шүүгээнд орох агаарыг халаах цахилгаан халаагуур, хатаах агаарыг сэлгэх тэнхлэгийн вентилятор,

конденсаторт байгалийн хүйтэн агаар өгөх тэнхлэгийн вентилятороос бүрдэнэ. Цахилгаан эрчим хүчний зарцуулалтыг тодорхойлбол

$$E = E_h + E_{f1} + E_{f2} \tag{6}$$

Энд, E_h - цахилгаан халаагуурын эрчим хүчний зарцуулалт, кВт ц; E_{f1} - хатаах агаар сэлгэх вентиляторын цахилгаан эрчим хүчний зарцуулалт, кВт ц; E_{f2} – конденсаторт байгалийн хүйтэн агаар өгөх

вентиляторын цахилгаан эрчим хүчний зарцуулалт, кВт ц; Нэгж хэмжээтэй цахилгаан эрчим хүч зарцуулж зайлуулах усны хэмжээ SMER (кг/(кВт ц)).

$$SMER = \frac{m_w}{E} \tag{7}$$

Нэгж чийглэг материалд зарцуулах цахилгаан эрчим хүчний хэмжээг MER-ээр илэрхийлдэг (кВт ц/кг) [10].

$$MER = \frac{E}{m_w + m_d} \tag{8}$$

2.6 Статистик боловсруулалт

Шугаман бус регрессийн шинжилгээг Matlab R2120a программ ашиглан хийлээ. Хатаах кинетикийг загварчлахын тулд таамаглах чадварын детерминацын коэффициент (R^2 , 9-р тэгшитгэл), алдааны

квадрат дундаж хазайлт (RMSE, 11-р тэгшитгэл), таамаглалыг шалгах хи-квадрат (χ^2 , 10-р тэгшитгэл), ач холбогдлын түвшнээр (P, 12-р тэгшитгэл) үнэлж, тодорхойлно.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp} - MR_{exp,i})^2} \tag{9}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \tag{10}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \tag{11}$$

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_{exp,i} - MR_{pre,i}|}{MR_{exp,i}} \tag{12}$$

энд $MR_{exp,i}$ – харьцангуй чийглэг MR -ийн i дүгээр туршилтын утга; $MR_{pre,i}$ – харьцангуй чийглэг MR - ийн i дүгээр урьдчилан таамагласан утга; \overline{MR}_{exp} - харьцангуй чийглэг MR -ийн туршилтын

утгын дундаж; N -хэмжилтийн тоо; z - загварын тогтмолын тоо.

Детерминацын коэффициент буюу R^2 хамгийн их, $RMSE$ болон χ^2 үзүүлэлт нь хамгийн бага бол загварыг сайн гэж дүгнэнэ.

3. Судалгааны үр дүн

3.1 Хатаалтын муруй

Жижиглэж хэрчсэн төмсний агаарын температур 42, 56, 65°C, урсгалын хурд 1 м/с байх үед хатааж хугацаанаас хамаарсан харьцангуй чийглэгийн (MR) өөрчлөлтийг 3-р зурагт харуулав. Хатаах хугацаа ихсэх тусам MR буурч байна. Хатаах төмсний зузаан тогтмол байхад хатаах температур жижиглэж хэрчсэн төмсний MR -д нөлөөлж

байгаа нь мөн харагдаж байна. 0.5×0.5×0.5 см хэмжээтэй төмсний зүсмэлийг 42, 56, 65°C температурт 300 минут хатаахад хугацааны төгсгөлд төмсний харьцангуй чийглэг харгалзан $MR=0.14$ ($W=0.34$), $MR=0.05$ ($W=0.20$), $MR=0.01$ ($W=0.1$) болсон байв.

3.2 Хатаалтын хурд

Хатаах температур 42, 56, 65°C байх үеийн чийг агууламжтай харьцангуй хатаах хурдыг 4-р зурагт үзүүлээ. Хатаалтын хурд тогтмол хэсэг байхгүй байна.

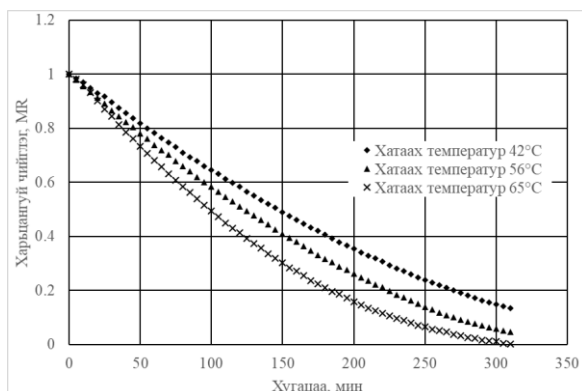


Figure 3. Variation of moisture ratio for potato slices dried at 42, 56 and 65°C

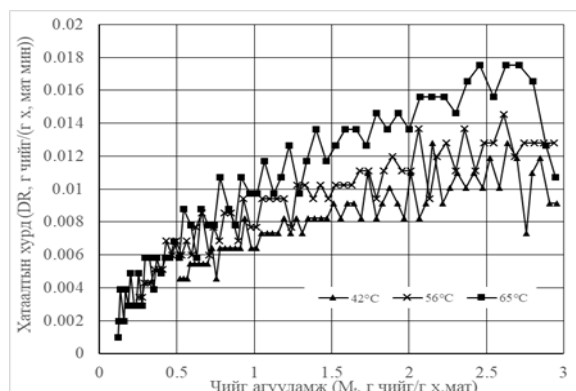


Figure 4. Drying rate versus moisture content of potato slices at 42, 56 and 65°C

3.3 Хатаалтын кинетик загвар

Эрдэмтдийн судалж тогтоосон математик загваруудыг харьцуулж харахын тулд R^2 , $RMSE$, χ^2 статистик үр дүн болон коэффициентуудыг 2-р хүснэгтээр

харууллаа. Бүх тохиолдолд R^2 утгууд 0.99-аас их, $RMSE$ болон χ^2 утга нь харгалзан 0.05710 ба 0.0032608-аас бага байсан.

Table 3.

Statistical result of models and its constant and coefficients

Агаарын температур, °C	Математик загварын нэр	Коэффициент	R ²	χ ²	RMSE
65	Lewis	k=0.008158	0.9691	2.9032×10 ⁻³	0.05388
	Page	k=0.001421; n=1.354	0.9969	2.9590×10 ⁻⁴	0.01720
	Wang & Singh	a=-0.005943; b=8.791e-06	0.9996	4.2131×10 ⁻⁵	0.006491
	Logaritmik	k=0.00560; a=1.283; a ₀ =-0.2459	0.9987	1.8415×10 ⁻⁵	0.01105
	Two Term	a ₁ =5.692; a ₂ =-4.703; k ₁ =0.01086; k ₂ =0.01301	0.9974	2.3305×10 ⁻⁴	0.01527
	Midilli et al.	k=0.002322; n=1.226; a=0.9949; b=-0.000250	0.9998	1.7813×10 ⁻⁵	0.00422
56	Lewis	k=0.006573	0.9640	3.2608×10 ⁻³	0.05710
	Page	k=0.0009887; n=1.37	0.9946	4.9235×10 ⁻⁴	0.02219
	Wang & Singh	a=-0.004756; b=5.403e-06	0.9996	3.3823×10 ⁻⁵	0.00581
	Logaritmik	k=0.003773; a=1.417; a ₀ =-0.3976	0.9988	1.0879×10 ⁻⁴	0.01043
	Two Term	a ₁ =-5.482; a ₂ =6.443; k ₁ =0.01395; k ₂ =0.01202	0.9942	5.4515×10 ⁻⁴	0.02335
	Midilli et al.	k=0.001679; n=1.224; a=0.984; b=-0.000335	0.9995	4.4121×10 ⁻⁵	0.00664
42	Lewis	k=0.005184	0.9757	1.1212×10 ⁻⁴	0.04218
	Page	k=0.001159; n=1.289	0.9981	1.4550×10 ⁻⁴	0.01197
	Wang & Singh	a=-0.003947; b=3.685e-06	0.9997	2.6109×10 ⁻⁵	0.00507
	Logaritmik	k=0.002874; a=1.506; a ₀ =-0.4889	0.9996	3.1984×10 ⁻⁵	0.00565
	Two Term	a ₁ =-3.81; a ₂ =4.792; k ₁ =0.01099; k ₂ =0.009167	0.9984	1.2775×10 ⁻⁴	0.01121
	Midilli et al.	k=0.001825; n=1.161; a=0.9959; b=-0.000343	0.9999	7.7580×10 ⁻⁶	0.00276

Wang and Singh математик загварын а ба b коэффициентын гаднах агаарын температур ба агаарын зарцуулалтаас хамарсан регрессийн тэгшитгэлийг тодорхойлохын тулд туршилтыг Central Composite Design аргаар төлөвлөж төлөвлөлтийн дагуу туршилт хийлээ. Конденсаторт гаднаас өгөх байгалийн хүйтэн агаарын температур ба зарцуулалт нь харгалзан -10, -15, -20°C; 7.85×10⁻³, 11.775×10⁻³, 15.7×10⁻³ м³/с байлаа.

Туршилтын төлөвлөлт болон Wang and Singh загварын а ба b коэффициентүүдийн утга, статистик үзүүлэлтүүдийг 4-р хүснэгтээр харууллаа. Статистик үзүүлэлтүүд болон коэффициентүүд R², χ², RMSE, a, b нь харгалзан 0.9963-0.9996, 1.25×10⁻⁵-4.323×10⁻⁴, 0.003548-0.02027, -0.005421- (-0.007864), 3.629×10⁻⁶- 1.933×10⁻⁵ байна.

Table 4.

Statistical results of Wang and Singh model and its coefficients at different drying conditions

	V×10 ³ , м ³ /с	T, °C	a	b	R ²	χ ²	RMSE
1	7.8500	-20	-0.005474	5.135e-06	0.9989	0.0000347	0.005892
2	15.700	-20	-0.007275	1.518e-05	0.9979	0.0000878	0.009371
3	7.8500	-10	-0.006337	9.505e-06	0.9985	0.0000578	0.007605
4	15.700	-10	-0.007864	1.933e-05	0.9899	0.0004323	0.02027
5	11.775	-15	-0.005920	6.758e-06	0.9977	0.0000830	0.009112
6	11.775	-15	-0.006386	5.519e-06	0.9963	0.0001793	0.0131
7	11.775	-20	-0.005699	3.629e-06	0.9981	0.0000697	0.00835
8	11.775	-10	-0.006475	1.06e-05	0.9985	0.0000562	0.007497
9	7.8500	-15	-0.005421	4.641e-06	0.9996	0.0000125	0.003548
10	15.700	-15	-0.006170	6.863e-06	0.9978	0.0000907	0.009527

Конденсаторт гаднаас өгөх хүйтэн агаарын зарцуулалт болон температураас хамаарсан а ба b коэффициентийг (13), (14) регрессийн тэгшитгэлээр тодорхойлов.

$$a = -2.04 \cdot 10^{-5}T^2 - 14.18313V^2 + 0.003490TV - 7.27 \cdot 10^{-5}T + 0.213248V - 0.012113 \quad (13)$$

$$b = 1.6 \cdot 10^{-7}T^2 + 0.181125V^2 - 2.8 \cdot 10^{-6}TV + 5.532 \cdot 10^{-6}T - 0.203821V + 7.4 \cdot 10^{-5} \quad (14)$$

3.5 Эрчим хүчний үр ашиг

Байгалийн хөргөлттэй конденсатор бүхий агаарын битүү сэлгэлттэй хатаах процессын эрчим хүчний зарцуулалтыг дулааны насостой хатаах процессын эрчим хүчний зарцуулалтыг тодорхойлдог аргачлалаар тооцож дулааны насостой хатаах процессын эрчим хүчний зарцуулалтай харьцуулж үзлээ. Эрчим хүчний зарцуулалтыг 7, 8-р томьёогоор тодорхойллоо. Байгалийн

хөргөлттэй конденсатор бүхий агаарын битүү сэлгэлттэй хатаагуурын SMER-ийн утга 0.24132-0.26624 кг/(кВт ц) завсарт хэлбэлзэж байлаа. Цахилгаан эрчим хүч нь конденсаторт гаднаас агаар оруулах болон хатаах агаарыг сэлгэх вентилятор, хатаах агаар халаах цахилгаан халаагуурт зарцуулагдана.

Table 5.

SMER and MER with air consumption and temperature

		Агаарын зарцуулалт, м ³ /с		
Температур		7.8500×10 ⁻³	11.775×10 ⁻³	15.700×10 ⁻³
SMER	-20 °C	0.25453	0.24746	0.24132
	-15 °C	0.26624	0.2559	0.24416
	-10 °C	0.26528	0.25688	0.24328
MER	-20 °C	1.86	1.96	2.16
	-15 °C	1.75	1.96	2.03
	-10 °C	1.80	1.91	1.95

4. Шүүн хэлэлцэхүй

Хатаах температур нэмэгдэхэд хатаах процессын хурд нэмэгдэж, улмаар хатаах хугацаа богиносож байгаа нь бусад судлаачдын [6, 7, 8] судалгааны ажлын үр дүнтэй ижил байна.

Хатаах температур нэмэгдэх тутам хатаах хурд өндөр байна. Жижиглэж хэрчсэн төмсийг хатаахад тогтмол хурдтай хатаах үе байгаагүй бөгөөд хатаах процесс нь бүхэлдээ хурд буурах нөхцөлд явагдаж байгаа нь судлаач Сингхийн [9] тодорхойлсонтой тохирч байна. Энэ үр дүн нь бусад хүнсний ногоо, тухайлбал хулуу, алим, лууван, улаан лоолийн зүсмэлтэй [10] ижил байна.

Судалгааны үр дүнгээс харахад Midilli нарын, Wang and Singh, Logarithmic загварын R²-ийн утга өндөр, RMSE болон χ²-ийн утга бага байна. Харьцангуй хувийн хазайлтын (P) дундаж утга Wang and Singh, Logarithmic, Midilli and Cukuc загвар бүрд харгалзан 2.27, 9.83 болон 3.5 % байв. Logarithmic загварын P утга нь нөгөө хоёроосоо хэт их, Wang and Singh загварын хувьд Midilli and Cukuc-ийн утгаас бага байна. Иймээс байгалийн

хөргөлтөөр чийг зайлуулах конденсатор бүхий агаарын битүү сэлгэлттэй хатаах процессыг тодорхойлох хамгийн тохиромжтой загвар нь Wang and Singh, Midilli and Cukuc байлаа. Хэрчсэн төмсийг хатаасан туршилтыг үндэслэн судлаач Самира [11] болон Яан [10] нар хамгийн тохиромжтой математик загвараар Midilli and Cukuc гэдгийг тодорхойлсон байдаг. Миний хийсэн судалгаагаар Midilli and Cukuc загвар сайн статистик үзүүлэлттэй болох нь тогтоогдсон боловч Wang and Singh загвар нь илүү тохиромжтой байсан.

Wang and Singh математик загварын а ба b коэффициентын регрессийн загвараас харахад хөргөх агаарын температур болон зарцуулалт нэмэгдэхэд b коэффициент нь нэмэгдэх, а коэффициент нь буурах хандлагатай байна. Дундаж квадрат хазайлт RMSE нь агаарын зарцуулалтаас бараг шугаман хамааралтай харин температур -16°C-ээс бага үед тогтвортой, түүнээс дээшлэх үед нэмэгдэх хандлагатай байна.

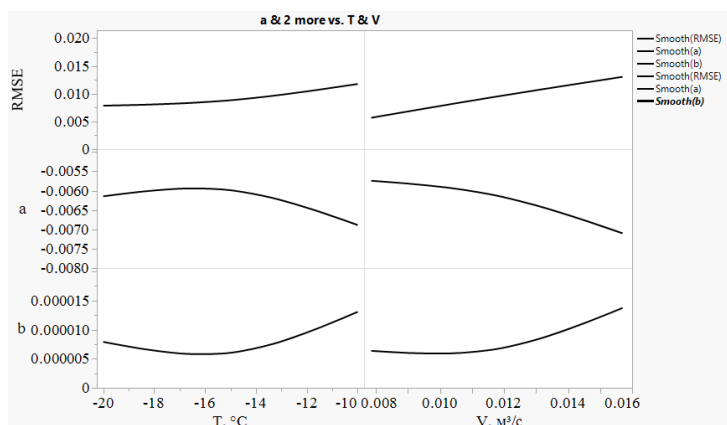


Figure 5. Dependence of a, b coefficients and RMSE on cold air temperature and consumption

Өөрийн туршилтаар тодорхойлсон SMER утгыг судлаачдын дулааны насос бүхий

хатаах процессын туршилтын үр дүнгийн утгатай харьцуулан 6-р зургаар үзүүллээ.

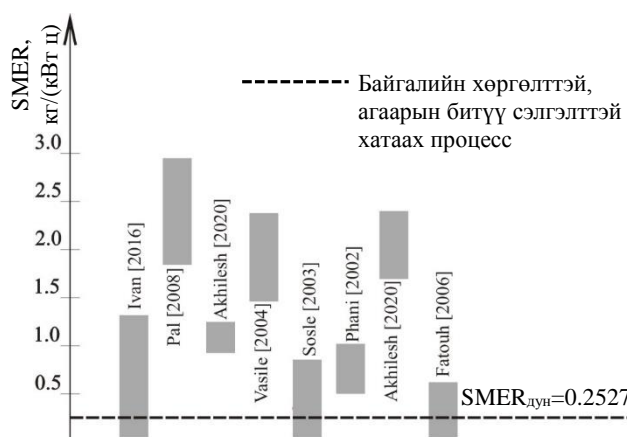


Figure 6. Comparison of SMER between natural cooling dryer and heat pump dryers

Хатаах агаарын эргэлтийн хэмжээ (хувь) нэмэгдэхийн хэрээр SMER-ийн утга буурдаг [12]. Энэхүү туршилтаар тодорхойлсон MER үр ашгийн үзүүлэлтийн утгууд нь 1.75-2.16 кВт.ц/кг хооронд хэлбэлзэж байв.

Судлаачдын олж тогтоосон дундаж утгууд нь 0.66 [11], 0.145 [5], 2.75 кг/кВт.ц [14] байсан бөгөөд миний туршилтаар тогтоосон утга нь дулааны насостой хатаагуурын хэлбэлзэх завсарт харгалзаж байна.

1. Дүгнэлт

Дээжийн зузаан ижил байх үед хатаах температур нэмэгдэх тусам төмсийг хатаах хугацаа багасаж байна. Бүтээгдэхүүнээс ялгарсан чийгийг шингэрүүлэн зайлуулж хуурайшуулсан агаараар битүү сэлгэлт хийн төмсийг 12 %-ийн төгсгөлийн чийглэгтэй болтол хатааж болно. Энэ аргаар төмс хатаах процессын математик загвар нь бусад судлаачдын боловсруулсан загвартай тохирч байна. Төмс хатаах процесст байгалийн

хүйтэн агаарын температур болон зарцуулалтын нөлөөг регрессийн тэгшитгэлээр илэрхийллээ. Регрессийн загварт нөлөөлөх ач холбогдлын түвшнээр үнэлбэл агаарын зарцуулалтын P утга нь (0.027) температурын утгаас (0.112) бага байгаа нь хүйтэн агаарын зарцуулалтаар тухайн процессыг удирдах боломжтой гэж дүгнэж байна.

Эрчим хүчний үр ашиг нь дулааны насостой хатаах процессын үр ашгийн завсарт оршиж байгаа боловч нэлээд бага байна. Нарны эрчим хүч болон бусад дэвшилтэт

технологийг дангаар, эсвэл хослуулан хэрэглэн агаарыг халааснаар эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжтой.

Ашигласан хэвлэлийн жагсаалт

- [1] AGHBASHLO, M., KIANMEHR, M.H. and ARABHOSSEINI, A. 2009. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Convers. Manage.* 50, 1348–1355. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.01.004>
- [2] ZLATANOVIC, I., KOMATINA, M., & ANTONIJEVIC, D. 2017. Experimental investigation of the efficiency of heat pump drying system with full air recirculation. *Journal Food Process Engineering*, 40(2), e12386. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12386>
- [3] AKHILESH ,S., JAHAR,S. AND RASHMI,R.S. 2020. Experimental energy-exergy performance and kinetics analyses of compact dual-mode heat pump drying of food chips. *Food Process Eng.* 2020;43:e13404. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13404>
- [4] VIVIAN N. PLETNEY. 2007. Focus on food engineering research and developments. y Nova Science Publishers, Inc.30-31.
- [5] IVAN ZLATANOVIC, MIRKO KOMATINA and DRAGI ANTONIJEVIC, 2016. Experimental investigation of the efficiency of heat pump drying system with full air recirculation. *Journal of Food Process Engineering*. 1745–4530. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12386>
- [6] ONWUDE DI, HASHIM N, ABDAN K, JANIUS R, CHEN G. Investigating the influence of novel drying methods on sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): Kinetics, energy consumption, color, and microstructure. *Journal of Food Process Eng.* 2018;41: e12686. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12686>
- [7] PARK H W, YOON W B. Effects of air movement in a hot air dryer on the drying characteristics of colored potato (*Solanum tuberosum* L.) using computational fluid dynamics. *Int J Agric & Biol Eng*, 2018; 11(1): 232–240. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20181101.3293>
- [8] V.P.CHANDRA MOHAN and PRABAL TALUKDAR, “Experimental Studies for Convective Drying of Potato,” *Heat Transfer Engineering*, 35(14–15):1288–1297 2014, <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.876844>
- [9] SINGH, N.J. AND PANDEY, R.K. 2012. Convective air drying characteristics of sweet potato cube. *Food Bioprod. Process.* 90, 317–322. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.06.006>
- [10] KAI FAN, LIBING CHEN, JIE HE AND FENGWEI YAN. characterization of thin layer hot air drying of sweet potatoes (*ipomoea batatas* l.) slices. *Journal of Food Processing and Preservation* july 6, 2014 <https://doi.org/10.1111/jfpp.12355>
- [11] SAMIRA NADERINEZHAD, NASRIN ETESAMI, AREFE POORMALEK NAJAFABADY AND MAJID GHASEMI FALAVARJANI, Matematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parametrs, *Food Science abd Nutrition*, 4 june 2015, <https://doi.org/10.1002/fsn3.258>
- [12] THEERAKULPISUT, S. 1990. Modelling heat pump grain drying system, PhD Thesis, University of Melburne, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Australia.
- [13] BRAUN, J.E., BANSAL, P.K. and GROLL, E.A. 2002. Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers. *Int. J. Refrig.* 25, 954–965. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00097-4)
- [14] PRASERTSAN, S. and SAEN-SABY, P. 1998. Heat pump dryers: Research and development needs and o ortunities, *Drying Technol.* 16, 251–270. <https://doi.org/10.1080/07373939808917402>

- [15] BRUCE, D.M. 1985. Exposed-layer barley drying, three model fitted to new data up to 150C. *J. Agric. Eng. Res.* 32, 337–347. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90098-8)
- [16] KARATHANOS, V.T. and BELESSIOTIS, V.G. 1999. Application of a thin layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *J. Agric. Eng. Res.* 74, 355–361. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0473>
- [17] OVERHULTS, D.G., WHITE, G.M., HAMILTON, H.E. and ROSS, I.J. 1973. Drying soybeans with heated air. *Trans. ASAE* 16, 112–113. <https://doi.org/10.13031/2013.37459>
- [18] WANG, C.Y. and SINGH, R.P. 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Trans. ASAE* 11, 668–672. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00018-4)
- [19] YALDIZ, O., ERTEKIN, C. and UZUN, H.B. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26, 457–465. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00018-4)
- [20] HENDERSON, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans. ASAE* 17, 1167–1172. <https://doi.org/10.13031/2013.37052>
- [21] AKPINAR, E.K. 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *J. Food Eng.* 73, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.007>
- [22] MIDILLI, A., KUCUK, H. and YAPAR, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Dry. Technol.* 20, 1503–1513. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- [23] TADEUSZ KUDRA, ARUN S. MUJUMDAR. 2002. *Advanced Drying Technologies*. Marcel Dekker, Inc. 270 Madison Avenue, New York, -468 p
- [24] SOSLE, V., RAGHAVANA, G.S.V. and KITTLER, R. 2003. Low temperature drying using a versatile heat pump dehumidifier. *Drying Technol.* 21, 539–554 <https://doi.org/10.1081/DRT-120018461>
- [25] AKHILESH SINGH, JAHAR SARKAR, RASHMI REKHA SAHOO. 2020. Experimental energy-exergy performance and kinetics analyses of compact dual-mode heat pump drying of food chips. *Food Process Eng.* 2020;43:e13404. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13404>
- [26] VASILE, M. 2004. Heat pumps for wood drying-new developments and preliminary result. *Maderas ciencia y tecnologia* .6(2), 123-132 <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2004000200003>
- [27] PHANI, K. ADAPA , SHAHAB SOKHANSANJ and GREG J. SCHOENAU.2002. Performance study of a re-circulating cabinet dryer using a household dehumidifier. 20, 1673-1689. <https://doi.org/10.1081/DRT-120015407>
- [28] FATOUH, M., METWALLY, M.N., HELALI, A.B. and SHEDID, M.H. 2006. Herbs drying using a heat-pump dryer. *Energy Convers. Manage.* 47, 2629–2643. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.022>
- [29] KIRBAS, I., TUNCER, A. D., S, IRIN, C., & USTA, H. 2019. Modeling and developing a smart interface for various drying methods of pomelo fruit (*Citrus maxima*) peel using machine learning approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104928. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.10.4928>
- [30] YOUSSEF, K. M. EMBABY, H. E. 2012. influence of drying air temperature, air velocity and surface load on drying kinetics and color of jew's mallow leaves. *J. Food and Dairy Sci., Mansoura Univ.*, Vol. 3 (7):401 – 416 <https://doi.org/10.21608/jfds.2012.77721>

Mathematical modeling and energy efficiency of drying process of potato in a closed-loop air circulation heat dryer with a moisture removal condenser through natural cool

Myagmarjav Chuluun*

Mongolian University of Science and Technology, Baga toiruu 34, 8th khoroo, Sukhbaatar district-14191, Ulaanbaatar, Mongolia

 <https://orcid.org/0000-0002-8954-5183>

*Corresponding author: myagmarjavchuluun@gmail.com

Received: 03.09.2022

Revised: 15.12.2022

Accepted: 18.01.2023

Abstract

Potatoes are a major global agricultural resource, where they are ranked as the fourth most commonly grown crop worldwide. In this paper, we examined the experimental results of potatoes drying via a closed-loop air circulation method. In order to cool the air and remove moisture in the drying process with closed-loop air circulation, we used natural cool air. Moisture escaped and cooled air is heated by an electric heater. The drying experiment was carried out on peeled potatoes in the form of cubes (5'5'5 mm) without any pre-treatment. Firstly, the potatoes were dried at an air flow rate of 1.0m/s and at temperatures of 42, 56, and 65°C. Then, air consumption and energy consumption efficiency were analyzed using Wang and Singh's mathematical model. The value of SMER was ranging between an interval of 0.24132-0.26624 kg/(kWh).

Key words: heat pump, low temperature drying, SMER and drying model