

Sušiarne

Meno a priezvisko: Ladislav Čopák

Akademický rok: 2016/2017

Abstrakt

Predmetom tohto elaborátu je stručný opis sušenia ako jednotkovej operácie ako aj zariadení na to určených. Súčasťou práce je aj fyzikálny obraz o sušení, ktorý je vytvorený na základe najčastejšie používaných veličín. Ich význam a vplyv sa demonštroval na konkrétnych príkladoch z priemyslu. Literárnou rešeršou sa dospelo k záverom, ktoré môžu viesť k zefektívneniu výroby. Vzhľadom na fakt, že sušenie je jednou z energeticky najnáročnejších operácií, sa tieto poznatky dajú v značnej miere aj reálne využiť a tým dospieť k finančnej úspore.

Európsky parlament a rada EÚ prijala smernicu 2012/27/EÚ, ktorej cieľom je zvýšenie energetickej efektívnosti tak, aby sa do roku 2020 primárna energetická spotreba znížila o 20 %. Pod primárnou energetickou spotrebou rozumieme rozdiel hrubej domácej spotreby a neenergetickej spotreby, t.j. napr. spotreba ropy určenej na výrobu plastov, nie na pohonné hmoty (1). Keďže najväčším „žrútom“ a teda aj znečisťovateľom životného prostredia sú Spojené štáty americké (2), niet divu, že celý svet obracia pozornosť na ochranu environmentu. Táto ochrana má spočívať nielen v prechode na spotrebu obnoviteľných zdrojov energie, ale práve aj v jej efektívnom využití. Znižovanie energetickej závislosti v priemyselnej sfére sa dá dosiahnuť analýzou výrobných procesov. Všeobecne platí, že šetrenie energiou sa dá dosiahnuť znížením nárokov napr. zavedením modernejších zariadení a zamedzením strát energie (neizolované rozvody teplej vody, mrhanie vysokopotenciálovým teplom,..). Jednou z energeticky najnáročnejších operácií v priemysle je sušenie. Preto sa na túto jednotkovú operáciu pozrieme bližšie. Zároveň sa uvedú konkrétne prípady, aké typy sušiarňí sa v jednotlivých odvetviach používajú a ako sa pri nich dá šetriť energiou, prípadne zvýšiť kapacitu výroby.

Skôr než sa zameriame na jednotlivé prípady, uvedú sa typy sušiarňí a aj fyzikálne veličiny, ktoré sa najviac využívajú pri analýze procesu sušenia. Sú to teda veličiny, z ktorých môžeme čo najviac zistiť, ako efektívne narábame s energiou.

relatívna vlhkosť vzduchu $\varphi = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0}$ je definovaná ako podiel parciálneho tlaku vodnej pary a jej saturačného tlaku pri danej teplote. Ako určite vieme, v lete je relatívna vlhkosť vzduchu pomerne nízka, hodnotu rovnú 1 nadobúda v období, kedy prší (vzduch je vtedy úplne nasýtený vodou). V zime má vysokú hodnotu (aj 90%), kedy je okolie schopné absorbovať málo pár pri nízkych teplotách. Okrem relatívnej vlhkosti poznáme absolútnu vlhkosť.

absolútna vlhkosť vzduchu $\bar{Y} = \frac{m_W}{m_G}$ vyjadruje množstvo vodnej pary na jeden kilogram suchého vzduchu. Čím má vzduch menšiu absolútnu vlhkosť, tým je lepší pre sušenie.

rosný bod vzduchu, ktorého stav je jednoznačne daný (napr. teplotou a relatívnou vlhkosťou) a predstavuje taký stav, kedy práve dochádza ku kondenzácii vodných pár, pričom vzduch má relatívnu vlhkosť 100%.

vlhkosť materiálu $w = \frac{m_{H_2O}}{m_{materiálu}}$ predstavuje podiel vody v sušenom materiáli. Vlhkosť materiálu pred sušením je zvyčajne známa (meraná veličina), vlhkosť materiálu po sušení je daná napr. technologickým reglementom alebo požiadavkami spotrebiteľa.

Sušiarne sú zariadenia, v ktorých dochádza k transportu vlhkosti (obvykle vody) zo sušeného materiálu do pomocného média, ktorým je najčastejšie (najlepšie) suchý a teplý vzduch. Suchosť vzduchu je dôležitá z hľadiska prestupu látky. Teplota média zase kvôli prestupu tepla do materiálu, kedy dochádza k zahrievaniu a následnému odparovaniu vody. V tomto prípade hovoríme o konvektívnom transporte tepla (nútené prúdenie vzduchu). Existujú však špeciálne typy sušiarňí, v ktorých sa energia vymieňa na základe radiačného efektu. Používajú sa napr. na úpravu vlhkosťného profilu papiera, pri výrobe špeciálnych druhov papiera (3) alebo aj v potravinárstve pri sušení ovocia (4).

Podľa toku materiálu rozlišujeme diskontinuálne (periodické) sušiarne a kontinuálne (nepretržité). Periodické sušiarne (batch) sa jednorázovo naplnia sušeným materiálom, vsádzka sa suší do požadovanej kvality a cyklus sa znova opakuje. Ich nevýhodou v porovnaní s nepretržite pracujúcimi sušiarňami je väčšia spotreba tepla alebo nerovnomernosť vysušenia materiálu. Typickým predstaviteľom periodických sušiarňí je skriňová sušiareň. Tá sa skladá z viacerých etáží, ktoré sa mimo zariadenia vyprázdnia a znova naplnia materiálom. Kontinuálnych sušiarňí je niekoľko typov: tunelové sušiarne, turbosušiarne, valcové sušiarne, alebo bubnové sušiarne. Prevádzkové náklady nepretržite pracujúcich sušiarňí sú pomerne malé. (5)

Pri radiačnom spôsobe sušenia sa dosahujú vyššie rýchlosti ohrevu a teda kratšie časy potrebné vysušenie v porovnaní s inými metódami. Nevýhodou je, že sa vyznačuje veľkou spotrebou energie. Preto je snaha kombinovať radiačný s konvektívnym typom sušenia. Tak napr. pri sušení plátkov melóna (4) je usporiadanie zariadení nasledujúce: do samotnej sušiarne vybavenej infračervenými lampami sa vháňa vzduch predhriaty v rekuperačnom výmenníku tepla vzduch-vzduch. Ohrevným médiom je vzduch, ktorý opúšťa sušiareň. Ohrievaným médiom je vzduch, ktorý sa ešte pred vstupom do rekuperátora ohreje pomocou solárneho kolektora. Spomínaný rekuperátor má kľúčovú úlohu, lebo dokáže zabezpečiť až 29% celkovo dodanej energie, čím znižuje energetickú náročnosť procesu. Z obr. 10 vidíme, že boli použité 2 módy sušenia: pri 50°C a pri 60°C a to s využitím rekuperátora (HR) a solárneho kolektora (SAC), resp. bez HR a SAC. Výsledky sú zrejmé: pri nižšej teplote sa spotrebuje menej energie a v prípade použitia HR a SAC je spotreba najmenšia. Pri vyššej teplote sa síce dosiahnu kratšie prevádzkové časy, ale melón má po sušení nežiaducu gélovitú konzistenciu. (4)

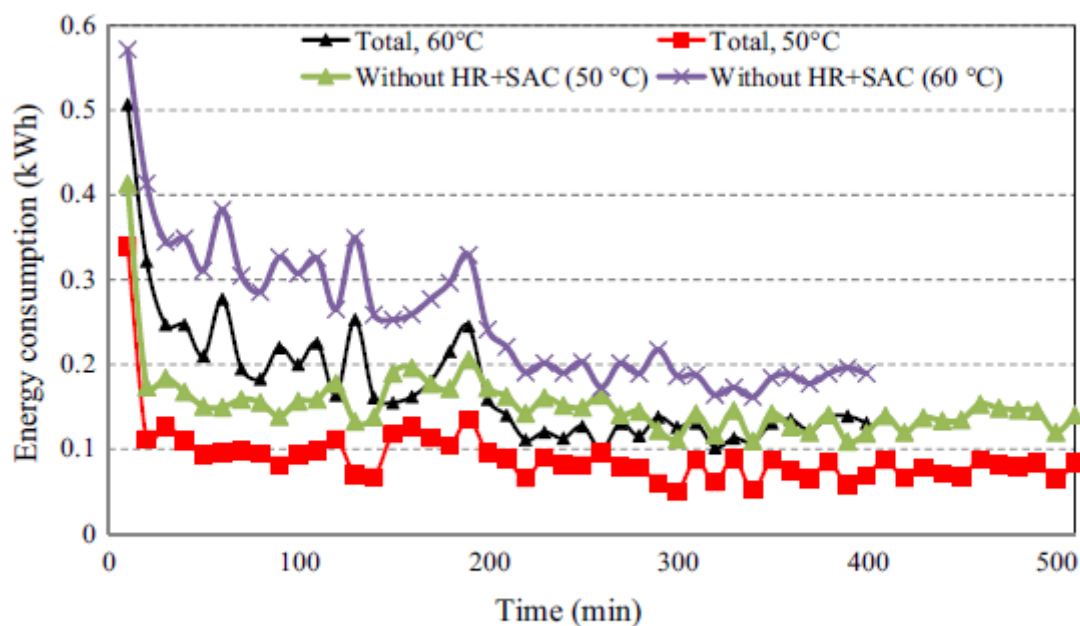


Fig. 10. Energy consumption of dryer during the experiments.

Oveľa častejšie spôsoby sušenia v potravinárstve, poľnohospodárstve alebo papierenskom priemysle sú s využitím konvektívnych sušiarňí.

Jeden z energeticky najnáročnejších procesov v poľnohospodárskom priemysle je práve sušenie zŕn obilia. V produkcii jačmeňa vo Fínsku na sušenie pripadá asi 30 % spotrebovanej energie. Typická energetická spotreba sušiarne zrna je 4-8 MJ na kilo odparenej vody (6). Určité štúdie uvádzajú mernú spotrebu na úrovni 2,5 MJ/kg (kontinuálne sušiarne s kombináciou súprúdového, protiprúdového a krížového toku fáz) alebo 4,4 MJ/kg (sušiarne s krížovým tokom fáz). Keďže jedna z možností, ako znížiť spotrebu energie je použitie sušiaceho vzduchu o vyššej teplote, v článku (6) sa rozoberá vplyv teploty vzduchu na sušenie. Problém je, že nie každý druh obilia znesie vysoké teploty, čo môže mať za následok nenávratné poškodenie zrna v zmysle zníženej klíčivosti (hlavne ovsa). Použitie teplejšieho vzduchu má tieto výhody:

- teplejší vzduch vie absorbovať viac vlhkosti a teda stačí menší prietok nasávaného vzduchu
- druhá vyplýva z grafu Fig. 1. Z priebehu kriviek sušenia si môžeme všimnúť, že na konci procesu, kedy je relatívna vlhkosť výstupného vzduchu nízka, je spotreba špecifickej energie menšia pri vyššej teplote sušiaceho vzduchu. Tento rozdiel je oveľa výraznejší na konci ako na začiatku sušenia.

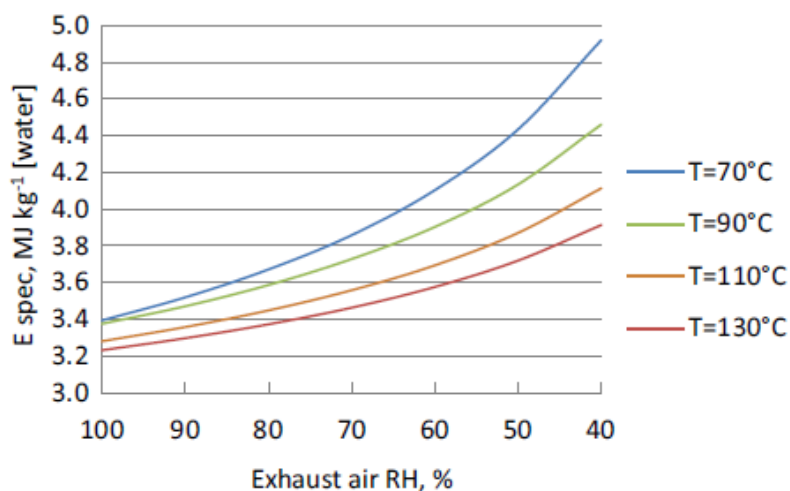


Fig. 1 – Specific energy consumption of an ideal dryer at different drying air temperatures and exhaust air RH, based on the psychrometric chart. Ambient air temperature was 15 °C and RH 80%.

Ďalšia možnosť, ako znížiť spotrebu energie, no zároveň zvýšiť výkon sušiarne je regulovať nielen teplotu ale aj prietok vzduchu zároveň. Podľa grafu uvedeného nižšie je zrejmé, že zvýšením teploty (zelená čiara) a regulovaním prietoku (červená čiara) sa dá skrátiť doba sušenia. Regulácia prietoku bola uskutočňovaná tak, že pri poklese relatívnej vlhkosti vzduchu opúšťajúceho sušiareň pod 70% sa zmenšil prietok nasávaného vzduchu.

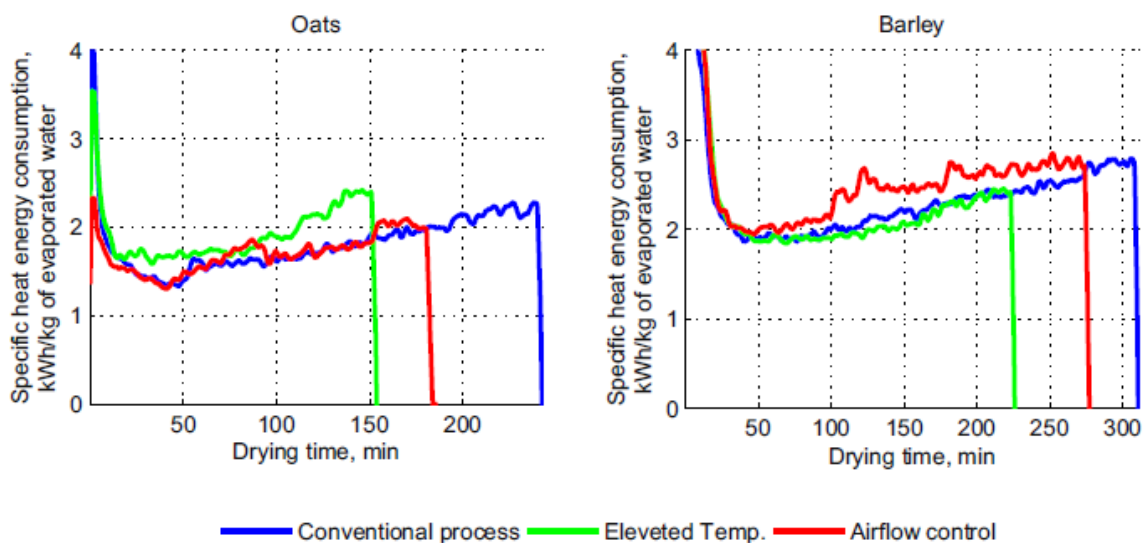


Fig. 9 – Specific energy consumption of different treatments and grain species.

Konvenčný spôsob sušenia je taký, pri ktorom prietok a teplota (70°C, bežná teplota pri sušení zrn) nebola počas sušenia menená. Zvýšením teploty na 90°C sa síce dosiahla najkratšia doba sušenia, ale špecifická spotreba bola v porovnaní s regulovaným prietokom vzduchu vyššia.

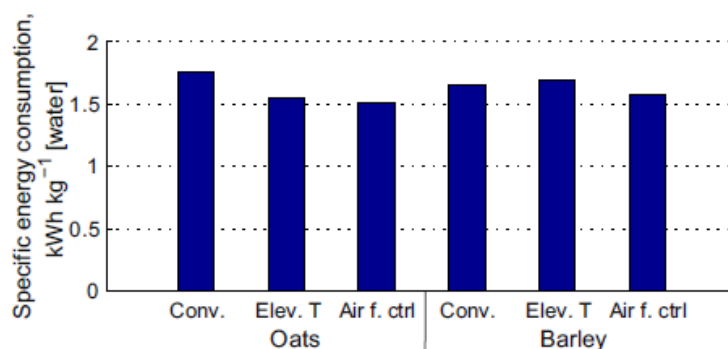


Fig. 10 – Comparison for specific electrical energy consumption of the heaters (kWh kg^{-1} [evaporated water]) for each drying process setting for oats and barley.

Podľa uvedenej štúdie (6) sú parametre vplyvajúce na ekonomický a efektívny chod sušiarne hlavne teplota a vlhkosť sušiaceho vzduchu ako aj kritická teplota sušeného materiálu. Tieto poznatky je možné využiť aj pri retrofite už existujúcich prevádzok. Na druhej strane, nie je uvedené, ako je zahrnuté do úspor ohriatie vzduchu. V článku je uvedený vzťah na výpočet príkonu ohrievačov, ktorý je chybný. Pevne verím, že je to výsledok nepozornosti autorov pri písaní článku.

Vo výrobe sušeného mlieka v Holandsku (r. 2000) na sušenie pripadá priemerne až 51% celkovej primárnej potreby energie. (7) V mliekarenskom priemysle sa v procese výroby sušeného mlieka zvyčajne používajú rotujúce bubny, ktoré sú zvnútra vyhrievané parou.

Materiál sa nanáša po povrch bubna a po vysušení sa sušina zoškrabe pomocou noža. Iný prístup k sušeniu, v mliekarenstve najpoužívanejší, predstavujú trysky, cez ktoré sa rozprašuje mlieko a to sa v prúde horúceho vzduchu suší. Keďže spotreba energie na kilo odstránenej vody pri takomto spôsobe sušenia je 10 až 20 krát vyššia ako pri odparkách, je bežnou praxou zakoncentrovať mlieko čo najviac ešte pred sušením. V závislosti od počtu stupňov je špecifická spotreba energie na úrovni: 1-stupňový systém: 4,9 MJ/kg odstránenej vody; 2-stupňový: 4,3 MJ/kg a 3-stupňový: 3,4 MJ/kg.

Inštalovaním rekuperácie tepla zo vzduchu opúšťajúceho rozprašovaci sušiareň sa dá zvýšiť účinnosť o 10 – 20 % (8). Takáto rekuperácia odpadného tepla sa dá aplikovať v širokej škále priemyslu. Systém na predohrev sušiaceho vzduchu sa hojne používa v množstve mliekarní v Spojených štátoch amerických. Na druhej strane treba podotknúť, že pri výmene tepla v systéme vzduch-vzduch treba väčšiu teplovýmennú plochu a tiež sa prejavujú problémy so zanášaním výmenníkov časticami vysušeného mlieka. V jednej prevádzke v Novom Zélande po nainštalovaní skleneného výmenníka tepla (ešte v r. 1980) klesol po 13 hodinách prevádzky výkon o 40 %, a to vďaka zanášaniu. Zanášanie výmenníkov sa dá redukovať rýchlou prúdenia vzduchu: čím vyššia rýchlosť, tým slabšia tendencia k zanášaniam a lepšie podmienky pre transport tepla. Na druhej strane s rastúcou rýchlou rastú straty tlaku. Lepšie podmienky pre transport tepla sú aj v prípade veľkého počtu rúrok vo vnútri výmenníka. Ale tiež platí, že čím viac rúrok, tým sa viac zanášajú. Vidíme, že sa tu jedná o energeticko-ekonomický optimalizačný problém, ktorý má ale zmysel riešiť len v tom prípade, ak je teplota vzduchu na výstupe aspoň 75°C. Problém so zanášaním zariadenia sa dá obísť jeho vhodným dizajnom (8).

Podľa článku (9) je papierenský priemysel jeden z tých energeticky najnáročnejších. Aj keď papierne sa od miesta k miestu líšia, princíp výroby je rovnaký. Ten pozostáva z týchto krokov:

príprava vodolátky – drvenie buničiny, pridávanie aditív, aby sa dosiahli potrebné vlastnosti materiálu

sitová časť – odstránenie vody s pomocou vákua a gravitačnej sily

lisová časť – ďalšie mechanické zahustenie vodolátky pritláčaním valcov

predsúšanie – papier postupuje cez parou vyhrievané valce oddelené od okolia kapotou. Za touto časťou zvykne bývať glejací lis (pridávanie 8% roztoku škrobu), ktorým síce vzrastie množstvo sušiny, ale aj vody, ktorú treba do istej miery v dosúšaní odstrániť

dosúšanie – finálna tepelná úprava papiera, po ktorej sa výrobok namotáva na navíjač

Asi 50% spotrebovanej energie vo forme tepla pripadá na sušiacu časť. Zdroj (10) uvádza, že spotreba tepla v stredne veľkom závode na výrobu vreckoviek je asi 50 GWh. Priemerná primárna energetická spotreba na tonu vyrobeného papiera a na tonu vyparenej vody je okolo 5800 MJ, resp. 4000 MJ. Úspora na úrovni len niekoľko percent predstavuje obrovské úspory energie a teda finančných prostriedkov. Preto je snaha vyvinúť technológie, ktoré znižujú energetickú náročnosť výroby. Väčšina však nie je zatiaľ komerčne dostupná.

Šetrenie energie (tepla) v sušení je založené na čo najväčšom zahutnení vodolátky ešte pred vstupom do sušenia a rekuperácii tepla z odchádzajúceho vzduchu. Ten sa môže využiť najprv na ohrev vhaňaného vzduchu a následne na ohrev vodolátky. V súvislosti so zvýšením teploty vodolátky o 10°C sú v článku (9) uvedené zaujímavé empirické poznatky o úspore pary. V grafe uvedenom nižšie si môžeme všimnúť ďalšie možnosti úspory energie (na y-osi je uvedená špecifická spotreba energie na kilogram odparenej vody)

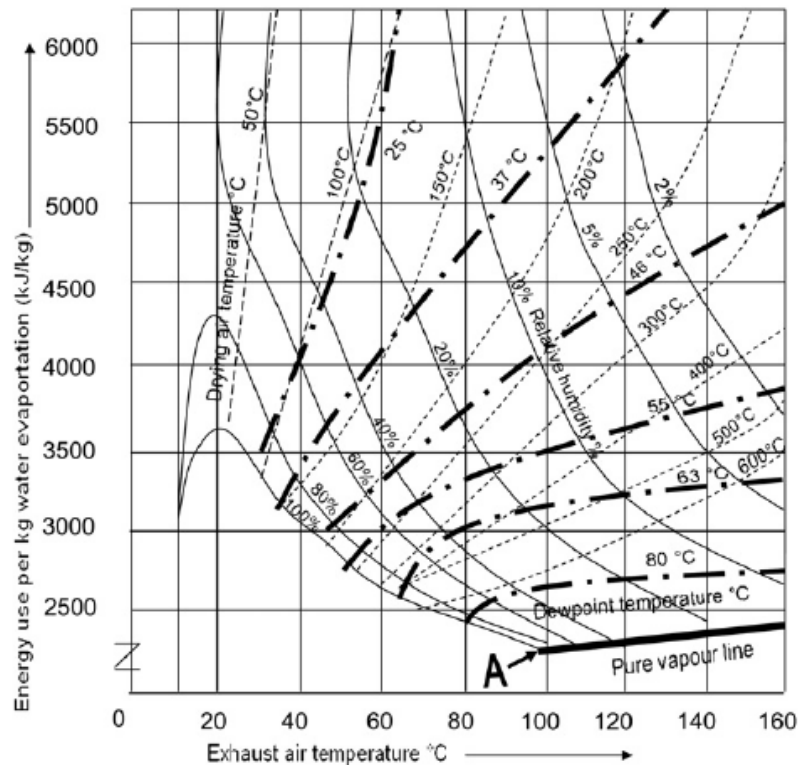


Fig. 7. Energy use per kg water evaporation at different multi-cylinder dryer exhaust air temperatures (adapted from [28]).

Aby bola zabezpečená dostatočná rýchlosť transportu vody, odporúčaná relatívna vlhkosť vzduchu by nemala byť väčšia ako 40%. Podľa grafu platí, že spotreba energie je tým menšia, čím vyššia je teplota sušiacieho vzduchu, čím je vyšší rosný bod¹ a čím vyššia je teplota odchádzajúceho vzduchu. Je zrejmé, že jeho vysoká teplota je výhodná nielen kvôli špecifickej spotrebe energie, ale aj z hľadiska rekuperácie tepla – je to vysokopotenciálové teplo.

Ďalšia možnosť ako znížiť množstvo použitej energie je použitie glejácich látok s vyšším obsahom sušiny. Dôvod je jednoduchý: koncentrovanejší roztok obsahuje menej vody, ktorá

¹ Samozrejme, pre chod sušiarne je vysoká hodnota rosného bodu (mala by byť garantovaná výrobcom stroja) nebezpečná kvôli nožnej kondenzácii pár – padajúce kvapky môžu poškodiť papier. Bežná teplota rosného bodu v moderných sušiarňach je 59°C.

sa musí v dosúšaní odstrániť. Keďže sa bežne používa len cca 6 - 8% roztok škrobu, najväčší potenciál je práve pri ňom.

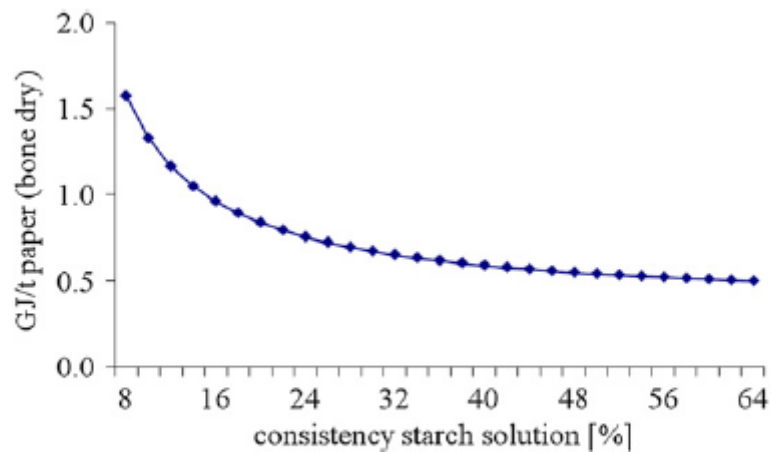


Fig. 6. Energy use in the final drying section at different starch solution consistencies.

Z grafu je zrejmé, že zvyšovanie koncentrácie škrobu na vysoké hodnoty nemá z hľadiska ekonomiky význam. Pri nimi uvažovaných podmienkach sa asi 60% úspora energie dá dosiahnuť len pri zvýšení koncentrácie z 8 na 30%. Navyše, všetky tieto úvahy sú ešte v štádiu výskumu.

Spomenuté súvislosti sa dajú overiť dvoma spôsobmi: matematickým modelovaním a experimentom. Význam matematického modelovania spočíva v hľadaní takých konfigurácií zariadení, aby sa dosiahla čo najmenšia spotreba energie. K tomu však treba dostatočný dobrý opis procesu v podobe rovníc a fyzikálno-chemických parametrov, ktoré sa nie vždy dajú tak ľahko nájsť. Príkladom môže byť aj simulácia výroby papierových vreckoviek. (10) Výsledky sa porovnali s reálnymi prevádzkovými údajmi a diskrepancia medzi nimi nedosiahla viac ako 5 %. Modelovanie teda môže byť celkom užitočný nástroj nielen pri hľadaní optimálnych podmienok prevádzkovania, ale aj pri overovaní teoretických úvah.

Zdroje

- (1) http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Primary_energy_consumption (7.11.2016)
- (2) <https://www.youtube.com/watch?v=90CkXVF-Q8M> (8.11.2016)
- (3) Žiško M.: Energetický audit papierenského stroja v Mondi SCP, a.s. – sušenie papiera a rekuperácia tepla (Diplomová práca), 2014, str. 25
- (4) Aktaş M. et al.: Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer, *Solar Energy*, Volume 137, 1 November 2016, Pages 500–515
- (5) Kossaczky E., Surový J.: Sušenie, *Chemické inžinierstvo II*, ALFA, 1987, str. 383-388, Bratislava, ISBN:302-05-118
- (6) Jokiniemi H., Ahokas J.: Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer, *Biosystems Engineering*, Volume 121, May 2014, Pages 209–220
- (7) Ramirez C. A., Patel M., Blok K.: From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry, *Energy*, Volume 31, Issue 12, September 2006, Pages 1984-2004
- (8) Walmsley T. G. et al.: Thermo-economic optimisation of industrial milk spray dryer exhaust to inlet air heat recovery, *Energy*, Volume 90, Part 1, October 2015, Pages 95-104
- (9) Laurijssen J., Gram F., Worrell E., Faaij A.: Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry, *Energy*, Volume 35, 2010, Pages 3738-3750
- (10) Marco P. et al.: Mathematical modelling and energy performance assessment of air impingement drying systems for the production of tissue paper, *Energy*, Volume 114, 1 November 2016, Pages 201-213

Abstrakty

Žiško M.: Energetický audit papierenského stroja v Mondi SCP, a.s. – sušenie papiera a rekuperácia tepla

Nowadays, the paper industry expanded almost to a whole world. The production of paper itself is very energy demanding and needs loads of electricity, heat and raw materials. This is the reason, why it is appropriate for this kind of industry to make regular energy audits. The goal of this project is to obtain knowledge about the theory of paper production and to check present technology of a particular paper machine, which was newly partly reconstructed. The project is oriented to that part of paper machine, where the stock is pumped to the wire section of the paper machine at whose end the finalized paper leaves the machine. The most important parts of process and equipment with relevant energetic consumption will be checked. Consequently, arrangements of lowering the energy consumption of a process and their investment costs and payback time will be suggested.

Aktaş M. et al.: Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer

Infrared drying systems are popular in terms of high heat and mass transfer. By using an infrared dryer, it is possible to catch fast heating and short drying time in comparison to the other drying methods. But it consumes a high amount of energy. Therefore, a new type solar air collector (SAC) and air to air heat recovery unit were added to the infrared dryer to reduce specific energy consumption. The general aim of this study is to analyze heat and mass transfer characteristics of the dryer and threedimensional (3-D) computational fluid dynamic (CFD) simulation and to investigate drying kinetics of melon slices. Experiments were performed at 50°C and 60°C melon's surface temperature and 0.5 m/s air velocity. Melon slices were dried from 9 g water/g dry matter to 0.044 g water/g dry matter moisture content. The effective moisture diffusivity (D_e) values varied from $8.25 \cdot 10^{-10}$ to $1.24 \cdot 10^{-9}$ m²/s. The average mass transfer coefficient (h_m) values increase from $8,53 \cdot 10^{-8}$ m/s at 50°C to $1.47 \cdot 10^{-7}$ m/s at 60°C. Heat recovery unit has a key role in this system and it provides 23–28% of total input energy. Average solar air collector efficiency was calculated as 50.6%. Obtained theoretical and experimental results are in line with each other. This study shows the successful and efficient combination of solar energy, infrared energy and heat recovery in food processing.

Jokiniemi H., Ahokas J.: Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer

One of the most energy intense operations in arable farming in temperate countries is grain drying. Several studies have indicated that using higher drying air temperatures offers opportunities to save energy during grain drying, but although to a certain extent grain can tolerate drying at higher air temperatures, this may compromise the viability of the grain. The aim of this study was to examine the energy saving approaches achieved by using an elevated drying air temperature and by manipulating drying airflow in a scaled-down mixed-

flow batch grain dryer. The drying airflow was reduced gradually as the drying process proceeded, and the drying air temperature was allowed to rise. The relative humidity of the exhaust air was used as a control factor to adjust the airflow. Energy savings were expected from the higher drying air temperature and, due to the reduced airflow, from the higher exhaust air humidity. The results showed energy savings of 5% for drying barley and 14% for drying oats. Increases in the evaporation rate of 5% and 17%, for barley and oats respectively. However, some degradation in grain viability was observed especially with oats. Further research is needed to find the correct control parameters and temperature limits for each cereal species.

Ramirez C. A., Patel M., Blok K.: From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry

In this paper, we conduct a cross-country analysis of energy consumption and energy efficiency for the dairy industry in four European countries. Changes in energy efficiency were monitored in two different ways. One way is to look at the energy use by tonne of milk processed by dairies (EEIp1). Another way is by comparing the actual energy use with the energy that would have been used if no changes in energy efficiency would have taken place (EEIp2). A characteristic of EEIp2 is that it corrects for differences in product mix among countries and in time. We found that changes in production mix are important in three of the four countries studied and that EEIp2 should be preferred when comparing levels of energy efficiency among countries or when there are significant changes in product mix. Once changes in product mix have been taken into account, our results show that France, Germany, the Netherlands and the United Kingdom have reduced their values in EEIp2, respectively by 0.4%, 2.1%, 1.2% and 3.8% per annum. The results also show that the British, German and Dutch dairy industries have converged towards similar (lower) values in their energy efficiency indicators and that the French dairy industry would save 30% if were to converge to similar values of EEIp as the ones obtained for Germany or the United Kingdom.

Walmsley T. G. et al.: Thermo-economic optimisation of industrial milk spray dryer exhaust to inlet air heat recovery

This study reports a thermo-economic design optimisation of an industrial milk spray dryer liquid coupled loop exhaust heat recovery system. Incorporated into the analysis is the ability to predict the level of milk powder fouling over time and its impacts on heat transfer and pressure drop. Focus is given to a finned round tube, a bare round tube and a bare elliptical tube. Modelling results show that spray exhaust heat recovery is economically viable for the considered industrial case study. Based on the results, the best liquid coupled loop heat exchange system uses a finned tube heat exchanger to recover heat from the exhaust air with a face velocity of 4 m/s and 14 tube rows, which gives a net present value of NZ\$2.9 million and an internal rate of return of 71%. The developed thermo-economic assessment method has the ability to cater to site specific needs that affect the utility savings and the capital cost for implementing exhaust heat recovery.

Laurijssen J., Gram F., Worrell E., Faaij A.: Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry

The paper industry is, with about 6% of the total worldwide industrial energy use, an energy-intensive industry. The drying section is with approximately 50% the largest energy consumer in a paper mill, energy use in this section is mainly heat use. Several options to decrease heat use in conventional multicylinder drying sections are investigated, calculating the effect on energy use. Optimization measures include a) decreasing the amount of water evaporation by applying additives in higher consistencies and by lowering the water viscosity, b) decreasing the heat use of water evaporation by increasing the dew point temperature of the dryer and c) increasing the amount of heat recovery by using exhaust air to not only pre-heat the incoming air but also to increase process water temperatures. These could all be achieved by retrofitting and/or choosing different processing conditions in existing factories. The combined thermal heat saving potential due to the optimization actions is 1.3 GJh/t paper (or 32% of the drying section's heat use) as compared to the reference situation.

Marco P. et al.: Mathematical modelling and energy performance assessment of air impingement drying systems for the production of tissue paper

In this paper an original and exhaustive mathematical modelling of air impingement drying systems for the production of tissue paper in the Yankee-hoods configurations is reported, which offers the possibility to optimize its energy performance. The model takes into account many detailed operative parameters of the overall drying process with the aim to execute its energy and mass balance and to evaluate its energy performances. The validity of the mathematical model has been assessed by comparison with actual data from an existing tissue paper mill. Finally, the energy performances of two different layouts of the air system have been evaluated and compared. Changing the operative parameters of the drying process, such as air jet temperature and speed and moisture content of the extraction air, it is possible to obtain the same paper production with an energy saving of about 4.5%. In average, the layout with two parallel air circuits assure an energy saving of about 1% with respect to the layout with a single air circuit.

Doplnkový zoznam literatúry

Hasan M., Langrish T.: Development of a sustainable methodology for life-cycle performance evaluation of solar dryers

An innovative methodology for the performance evaluation of solar dryers, which considers the total life-cycle (LC) energy effectiveness in present-value terms, has been proposed. In this method, the performance of solar dryers has been defined in terms of a set of performance parameters, called present value performance indicators (PVPIs). By applying the concept of unsteady-state mass and energy balances for solar kilns, and using known diffusion and heat transport equations from drying theory, a mathematical model was constructed and subsequently solved to predict the future thermal energy inflows and outflows as part of the assessment of the performance parameters. In order to illustrate the overall methodology proposed in this study, the model has been applied, as an example, to a case-study greenhouse-type solar kiln (i.e. Oxford) in the context of hardwood drying in Australia. The current methods used for the performance evaluation of solar dryers have also been reviewed, and it was found that the proposed method was likely to overcome the shortcomings and inadequacies of the current practices for assessing the performance of solar dryers. A sensitivity analysis was carried out in order to assess the robustness of the estimated performance indicators against the uncertain parameters.

Kumar M., Khatak P., Sansaniwal S.: Progress in solar dryers for drying various commodities

Uncertain price rise and rapid depletion of fossil fuels accelerated the development of renewable energy sources in the form of alternative power sources. Solar is an abundant, renewable and sustainable energy source that attracted many eminent researchers across the world to work in the field of solar energy applications. In developing countries, solar drying is capable of fulfilling the increasing demand of healthy, low cost natural foods and need for sustainable income. Solar dryers used for agricultural product drying can be proved to be most useful device from energy conservation point of view that not only save energy but also saves a lot of time, occupying less area, improves product quality and personnel life style. A solar crop drying system does not solely depends on solar energy for its functioning besides many recent advancements in drying process which combines other form of auxiliary heating source with sun energy are also in recent trends for reducing fuel consumption. In this paper, a review of various types of solar dryers namely, direct solar dryers, indirect solar dryers, hybrid solar dryers and their various drying applications are represented.

Prakash O. et al: Review on various modelling techniques for the solar dryers

This review paper is focused on the various modelling techniques for the solar dryer system. The modelling techniques are very important to develop, increase drying efficiency, analyse and predict the performance of different kinds of solar drying system. The modelling

techniques are also important for predicting the temperature of crop moisture content, drying rate, quality of crop and colour of crops. Computational fluid dynamics (CFD) can be applied for analysing and investigating of air flow and spray of temperature in the drying system. Adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS) can be used to predict the behaviour of the solar drying system. ANN is used to calculate the mass of the dried crops on hourly basis. FUZZY is very important software for using the simulation of drying system. That can also be used to accurately predict the results with a minimum error. The mathematical modelling techniques are used for testing the drying behaviour of crops in the laboratory. It acts in effect as a tool between scientists and investigators. It helps to save vast amounts of time, energy and money in experimental events. Before fabrication the modelling techniques are very supportive in simulation of different types of solar drying system. Thus, analysis on the basis of modelling techniques is not only save time but also save the capital investment in solar drying system. The advantage and future scope of modelling techniques is also discussed.

Jairaj K. S., Singh S. P., Srikant K.: A review of solar dryers developed for grape drying

This paper attempts to review various solar dryers developed exclusively for grape drying on a normal scale. Many popular varieties of solar dryers, certain typical models as well as traditional methods practiced for drying grapes are presented in this paper. Technical and economical results have proved that solar drying of grapes is quite feasible. Commercialization of solar drying of grapes has not gained momentum as expected, may be due to high initial investment and low capacity of the dryers. Even, the farmer's acceptance of solar dryers developed is not encouraging. Exhaustive research and development work has to be carried out in order to make solar drying of grapes economical and user friendly. There has been a remarkable achievement in solar drying of grapes due to sustained research and development associated with the adoption of advanced technologies. A review of various solar drying models for grapes is thus necessitated.

Yadav V., Moon C. G.: Modelling and experimentation for the fabric-drying process in domestic dryers

Theoretical analysis of the physical drying process occurring inside the household electric tumbler cloth-dryer is performed to determine various thermo-physical parameters affecting the energy consumption and for the development of a simulation model. Experiments are conducted on a test set-up based on a compact tumble-dryer to measure the values of parameters necessary for evaluating the performance. Three widely-accepted economy standards are considered for comparison of simulation and experimental results. Simulation results are in fair agreement with experimental data. An empirical correlation for the specific moisture-extraction rate (SMER) is developed to translate energy consumption information from one standard to the other.

Ndubisi A. et al.: Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer

Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer were carried out to assess the performance of the system in terms of energy utilization, energy utilization ratio, energy efficiency, exergy inflow and outflow, exergy loss and exergetic efficiency. The results indicated that for the starch with ash content of 0.76%, 0.85% crude protein, 0.16% crude fat, negligible amount of fiber, average granule size of 14.1 μm , pH of 5.88, amylose content of 23.45% and degree of crystallinity of 22.34%, energy utilization and energy utilization ratio increased from 1.93 to 5.51 J/s and 0.65 to 0.6 as the drying temperature increased from 40 to 60 °C. Energy efficiency increased from 16.036 to 30.645%, while exergy inflow, outflow and losses increased from 0.399 to 2.686, 0.055 to 0.555 and 0.344 to 2.131 J/s respectively in the above temperature range. Exergetic efficiency increased with increase in both drying air temperature and energy utilization and was lower than energy efficiency. Exergetic improvement potential also increased with increase in drying air temperature. Model equations that could be used to express the energy and exergy parameters as a function of drying temperature were established.