

Prevádzkové problémy pri odparkách a doplnkové technológie na zníženie energetickej náročnosti odpariek

Meno a priezvisko: Peter Vargai

Akademický rok: 2016/2017

Bratislava

Obsah

Referencie.....	3
Doplňková literatúra.....	3
Advanced energy saving in the evaporation system of ammonium sulfate solution with self-heat recuperation technology	4
Appropriate placement of vapour recompression in ultra-low energy industrial milk evaporation systems using Pinch Analysis.....	4
Heat Transfer and Heat Transfer Fouling in Kraft Black Liquor Evaporators	5
Chemical process simulation for minimizing energy consumption in pulp mills.....	5
Optimization of process integration in a Kraft pulp and paper mill – Evaporation train and CHP system	6
Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant	6
Abstract	7

Referencie

1. **Han, Dong, a iní.** Advanced energy saving in the evaporation system of ammonium sulfate solution with self-heat recuperation technology. *Energy Procedia*. 2014, 61, s. 131-136.
2. **Walmsley, Timothy G., a iní.** Appropriate placement of vapour recompression in ultra-low energy industrial milk evaporation system using Pinch Analysis. *Energy*. 2016, s. 1-13.
3. **Müller-Steinhagen, H. a Branch, C. A.** Heat Transfer and Heat Transfer Fouling in Kraft Black Liquor Evaporators. *Experimental Thermal and Fluid Science*. s.l. : Elsevier Science Inc., 1997, s. 425-437.
4. **Cardoso, Marcelo, a iní.** Chemical process simulation for minimizing energy consumption in pulp mills. *Applied Energy*. 2009, 86, s. 45-51.
5. **Mesfun, Sennai a Toffolo, Andrea.** Optimization of process integration in a Kraft pulp and paper mill - Evaporation train and CHP system. *Applied Energy*. 2013, 107, s. 98-110.
6. **Higa, M., a iní.** Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant. *Applied Thermal Engineering*. 2009, 29, s. 515-522.

Doplňková literatúra

7. **Kossaczký, E. a Surový, J.** Odparovanie. *Chemické inžinierstvo I*. Bratislava : ALFA, 1972, s. 336-377.
8. **Habánek, M.** Analýza prípravy napájacej vody. *Bakalárska práca*. 2015, s. 15-21.
9. **Lazzaretto, A. a Toffolo, A.** A method to separate the problem of heat transfer interactions in the synthesis of thermal systems. *Energy*. 2008, 33, s. 163-170.
10. **Chabanon, E., Mangin, D. a Charcosset, C.** Membranes and crystallization processes: State of the art and prospects. *Journal of Membrane Science*. 2016, 509, s. 57-67.
11. **Walmsley, T. G., a iní.** Pinch analysis of an industrial milk evaporator with vapour recompression technologies. *Chemical Engineering Transactions*. 2015, 45, s. 7-12.
12. **Al-Juwayhel, F., El-Dessouky, H. a Ettouney, H.** Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps. *Desalination*. 1997, 114, s. 253-275.
13. **Khanam, S. a Mohanty, B.** Energy reduction schemes for multiple effect evaporator systems. *Applied Energy*. 2010, 87, s. 1102-1111.

Advanced energy saving in the evaporation system of ammonium sulfate solution with self-heat recuperation technology

A concept of a novel double-stage mechanical vapor recompression (MVR) evaporation system based on the principles of self-heat recuperation technology for ammonium sulfate solution processing is proposed. In the paper, the single-stage and double-stage MVR evaporation systems for ammonium sulfate solution are designed and analyzed. A parametric study is performed to investigate the effects from the emission concentration of the first stage, the evaporation temperature and the temperature difference (TD) between the condensing steam and the boiling solution on the power consumption and heat transfer. During the investigation, the initial ammonium sulfate solution with a concentration of 3% is concentrated to the saturation solution, which has a concentration of 53%. The results show that despite the satisfaction to the principle of self-heat recuperation technology for the two systems, the boiling point elevation will result in a high energy consumption for the compressor in the single-stage MVR system, while the double-stage MVR evaporation system has an obvious energy saving effect with an improved amplitude of 40%.

Keywords: self-heat recuperation technology; mechanical vapor recompression; energy saving; evaporation; boiling-point elevation.

Appropriate placement of vapour recompression in ultra-low energy industrial milk evaporation systems using Pinch Analysis

This study focuses on applying Pinch Analysis to an industrial milk evaporator case study to quantify the potential energy savings. Modern milk evaporators are typically integrated using both mechanical and thermal vapour recompression technologies as the primary means for attaining a high level of energy efficiency. A significant step change in energy efficiency for milk evaporators is achieved in this study by appropriate placement of vapour recompression in a new improved two-effect milk evaporation system design. The Grand Composite Curve helps identify areas for process modifications and placements of vapour recompression that result in energy reduction. In particular, the innovative placement of Mechanical Vapour Recompression in the system unlocks significant energy, energy cost, and emissions savings. The new design requires 78% less steam (6397 kW) at the expense of 16% (364 kWele) more electricity use. The estimated cost savings associated with the improved design is \$942,601/y and the emissions reduction is 3416 t CO₂-e/y. Further energy efficiency improvements and cost savings of \$1,411,844/y are gained through improved Total Site Heat Integration through recovery of waste heat from the dryer exhaust air and boiler return condensate streams.

Keywords: Pinch Analysis; evaporation systems; process integration; dairy processing; vapour recompression.

Heat Transfer and Heat Transfer Fouling in Kraft Black Liquor Evaporators

A large number of experiments have been performed with New Zealand Forest Products Kraft black liquor to measure heat transfer coefficients and fouling rates during convective and subcooled flow boiling heat transfer as a function of surface temperature, bulk temperature, velocity, and solids concentration. Results from experiments with two chemical fouling inhibitors, with Teflon surface coating and in plate and frame heat exchangers, also are presented. The fouling deposits are analyzed with respect to appearance, composition, and process conditions for which they were obtained. With the assumption of chemical reaction-controlled fouling, a deposition model is developed and compared with the experimental data.

Keywords: evaporator fouling; Kraft black liquor; fouling mitigation; modelling.

Chemical process simulation for minimizing energy consumption in pulp mills

Chemical process simulation has proven to be an effective tool for performing a systematic and global analysis of energy systems to identify routes for maximizing the process efficiency concerning to the heat recovery. This paper shows an application of computer simulations in a Brazilian pulp mill, using two strategies for minimizing the mill energy consumption. In the first one, the overall heat transfer coefficient has been predicted for each body of the multiple effect evaporators by using continuous on-line data from the industrial plant in the black liquor recover unit. By monitoring oscillations of this heat transfer coefficient, the suitable time for washing the evaporator heat transfer surfaces can be well determined, reducing the energy loss during black liquor evaporation. In the second strategy, the liquor combustion has been simulated as function of the black liquor solids concentration to analyze its effect on the recovery boiler efficiency improvement.

Keywords: process simulation; minimizing energy; pulp mill.

Optimization of process integration in a Kraft pulp and paper mill – Evaporation train and CHP system

A great interest has been arising about the production of fuels and advanced chemicals from renewable resources such as wooden biomass in the so-called biorefineries. Pulp and paper mills are often seen as the most obvious fundamental module of such industrial sites, because of the common feedstock and the chemical transformations that already occur in the process. In this paper the model of real Kraft pulp and paper mill is developed and optimized from energetic point of view using process integration techniques, in order to assess the potential for energy saving and to establish a starting point for future research on biorefinery sites. Improvements to the configurations of the multi-effect evaporator and of the steam cycle in the CHP system have been introduced, and three different levels of heat integration boundaries have been considered (multi-effect evaporator, mill sub-processes, and total site). Results indicate a significant potential for the decrease in thermal energy requirement and/or the increase in power production for the same pulp and paper production.

Keywords: pulp and paper mill; process integration; HEATSEP method.

Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant

Besides the largest energy consumption in the process of sugar production, evaporation also presents many opportunities of thermal integration with the remaining of the process. That occurs due to the possibility of making use of the vapor generated during the evaporation operation (vegetal vapor), as a heating source, from extractions to process. Regarding the thermal integration of the multiple effect evaporator (MEE), previous studies showed that, in general, the energy recovery is usually larger when extractions are practiced in the last effects of the operation. Although the results found can be used for development of new projects, as heuristic rules, the application has been limited due to the lack of understanding on the subject. In the present investigation, a study was carried out by defining equations that can be used as a reference for thermal integration projects, including MEEs. The equations are also helpful for elaborating a systematic way to apply pinch analysis in sugar plant with an algorithm.

Keywords: Pinch analysis; sugar industry; multiple effect evaporator; process integration.

Abstract

The aim of this work is to show what could be the most common operational problems with multiple effect evaporators and what possible additional technologies can be implemented to maximize the energy savings in the evaporation process. Six different journal articles are compared with the focus on how to simulate a multiple effect evaporator with the minimal energy costs, integration of the evaporator into the production process in order to further calculate potential energy savings, and vapour recompression.

Keywords: multiple effect evaporator; vapour recompression; Pinch analysis; process integration; pulp mill.

Vo všeobecnosti sú prevádzkové problémy odpariek spojené s čo najväčším využitím energie za čo najmenšie náklady. Hľadanie najefektívnejších prevádzkových parametrov súvisí vo veľkej miere od konštrukcie odparky a od materiálu, ktorý sa spracováva. Z hľadiska konštrukcie sa odparky delia na jednočlenné a viacčlenné. Jednočlenné odparky sú najmenej efektívne, pretože na 1 kg tvornej pary sa odparí približne 1 kg vody z roztoku. Pri viacčlenných odparkách sa však odparená štiavna para z predchádzajúceho člena vedie ako ohrevná para do ďalšieho člena, čo znamená, že s použitím odpareného 1 kg štiavnej pary je teoreticky možné v ďalšom člene odparky odpariť ďalší 1 kg štiavnej pary. V skutočnosti však odparené množstvo bude menšie kvôli stratám tepla (napr. v trojčlennej odparke na 1 kg tvornej pary nedoparím 3 kg vody, ale iba približne 2,6 kg). Usporiadanie prúdov v odparkách môže byť súprudné, protiprúdne alebo dokonca aj kombinácia súprudného a protiprúdneho usporiadania. Voľba usporiadania prúdov a počtu členov odparky závisí od technológie výroby, množstva spracovaného materiálu, ostrosti zakoncentrovania, parametrov tvornej pary a podobne.

U odpariek sa častokrát využíva rekompresia pary. Štiavna para sa kompresorom stlačí na tlak trochu vyšší ako pôvodná výhrevná para a používa sa na ďalšie odparovanie, čím sa ušetrí energia na výrobe výhrevnej pary. Pri simulácii zahusťovania roztoku amoniaku sa porovnávala spotreba kompresora a tepla pre jednostupňovú a dvojestupňovú odparku s mechanickou rekompresiou pary voči trojestupňovej odparke bez rekompresie pary. Pri porovnávaní sa berie do úvahy aj čo najväčšie využitie odpadového tepla na predohrevy suroviny. Celková spotreba kompresora a tepelný prúd výhrevnej pary sú prerátané na tvorbu energie spaľovaním uhlia. Spotreba energie je porovnávaná pri dvoch teplotných rozdieloch 8 °C a 16 °C (rozdiel teploty kondenzujúceho prúdu pár a teploty varu roztoku). Dvojestupňová odparka s rekompresiou dosahuje najvyšších ušetrených energií. Spotreba kompresora však stúpa so zvyšujúcim sa teplotným rozdielom a zvyšujúcim sa zakoncentrovaním štiavných pár (1). Dôležité je taktiež umiestnenie rekompresie pary a smerovanie prúdov. Správne návrh rozmiestnenia zariadení dokáže ďalej navýšiť úspory dosiahnuté inštalovaním rekompresie (2). Štúdia sa zaoberá priemernou továrňou na výrobu sušeného mlieka na Novom Zélande. Výhodou tejto štúdie je to, že uvažuje s optimálnym umiestnením rekompresie nielen voči samotnému sušeniu mlieka, ale berie do úvahy a porovnávanie ušetrených energií aj čo najoptimálnejšie využitie odpadného tepla z prúdov kondenzátu. Štúdia sa zaoberá priemernou továrňou na výrobu sušeného mlieka na Novom Zélande. Na kvantifikovanie týchto úspor je možné použiť napr. Pinch analýzu, ako je aj uvedené v článku. Pomocou tejto analýzy sa určí minimálna spotreba energie a na základe toho sa určia maximálne potenciálne úspory. Ďalším problémom môže byť už spomínaný materiál, ktorý je potrebné zahustiť. Ďalšia štúdia sa zaoberá prestupom tepla a zanášaním odparky na čierny lúh v Novozélandskej fabrike na výrobu celulózy. V tejto štúdii je taktiež uverejnený model zanášania ich odparky, vplyv rôznych parametrov na prestup tepla (napr. obsah tuhých častíc v roztoku) a model je porovnaný s experimentom. V štúdii sú taktiež prediskutované možnosti zníženia intenzity zanášania sa takéhoto systému, napríklad nanosením vrstvy teflónu na povrch zariadenia. To sa však ukázalo ako nie príliš efektívna metóda, pretože síce by sa týmto znížila intenzita zanášania povrchu, ale jeho opakované čistenie by mohlo postupom času erodovať teflón. Všetky prednesené modely ukazujú konzistentné výsledky v porovnaní s experimentami, avšak celá štúdia je špecifikovaná striktno na odparky čierneho lúhu a v článku nie je uvedené, do akej miery by sa tieto výsledky a modely dali aplikovať na systémy s inými roztokmi. Taktiež tento článok je z roku 1997, takže je možné, že odvtedy boli v tomto smere vedené mnohé ďalšie štúdie so spresnenými informáciami, hlavne čo sa týka ceny zariadení a výšky

potenciálnych úspor (3). Odparkou na čierny lúh sa zaoberá aj ďalší článok. Predmetom ich štúdie je Brazílska celulózka. Opäť sa jedná o čo najväčšie zefektívnenie výrobného procesu s cieľom čo najviac znížiť náklady na prevádzku spojené s prestupom tepla. Tu sa však úspory nezisťujú pomocou Pinch analýzy, ale prevádzka sa optimalizuje pomocou simulačného programu WinGEMS. Hlavným predmetom analýzy je úhrnný koeficient prestupu tepla pre každý stupeň viacstupňovej odparky a simulácia prevádzkovania tzv. „recovery boiler“, kde autori skúmali prácu tohto zariadenia so zmenou koncentrácie tuhých častíc v čiernom lúhu. Celkovo je v článku uvedených niekoľko výsledkov simulácii pre prevádzkové parametre danej fabriky, avšak na rozdiel od predchádzajúceho článku, v tomto nie je žiadne finančné ohodnotenie (t. j. potenciálne vyčíslenie úspor). Taktiež autori vyjadrujú záver, že na zvýšenie efektivity prevádzkovania bojleru je potrebné vypaľovať čierny lúh s koncentráciou tuhých zložiek viac ako 80%, avšak hneď aj uvádzajú, že dostať takto zahustený lúh je prakticky nerealizovateľné. Problémom je to, že sa lúh nedá zakonzentrovávať na takú vysokú koncentráciu kvôli veľkej zmene viskozity. Na záver autori uvádzajú, že implementácia týchto návrhov musí ísť ruka v ruke s novými, pokročilými metódami na znižovanie viskozity čierneho lúhu s vysokou koncentráciou tuhých častíc (4). Nasledujúci článok sa zaoberá návrhom modelu celulózky a jeho následnou optimalizáciou z tepelného hľadiska. Simulácie prebiehali v Matlabe/prostredí Simulink za použitia HEATSTEP metódy. V modeli sa uvažuje aj to, že fabrika disponuje vlastnou parnou turbínou, na ktorej vyrába elektrinu pre vlastné použitie. Proces optimalizácie je rozdelený do troch častí – optimalizácia iba samotnej odparky, optimalizácia celulózky a jej procesov bez výroby elektriny a optimalizácia celulózky s výrobou elektriny. Optimalizácia sa sústreďuje výhradne na maximalizáciu využitia tepelnej energie zo všetkých prúdov (5). Šiesty článok skúma čo najoptimálnejšie využitie odpadného tepla odparenej vode z odpariek ako ohrev iných prúdov v procese výroby cukru. Štúdia najprv optimalizuje odparku Pinch analýzou a potom odparku integruje do zvyšku procesov. Potom porovnáva výsledky pre trojstupňovú, štvorstupňovú a päťstupňovú odparku. Výsledky štúdie hovoria, že vo všeobecnosti energetická spotreba celého procesu je najnižšia vtedy, ak sa ako integrované prúdy používajú prúdy pary z posledných členov odparky (6).

Optimálne prevádzkovanie odpariek závisí od veľa faktorov. Medzi najdôležitejšie patria parametre ohrevnej pary a parametre roztoku, ktorý sa v procese zahusťuje. Viacstupňové odparky sú obzvlášť citlivé na zmenu parametrov ohrevnej pary (hlavne tlaku), pretože ak sa zmení tlak v prvom člene odparky, reťazovo sa budú meniť tlaky aj v ostatných členoch. Pri zlom nadimenzovaní sa potom môže stať, že napríklad všetka para nebude stíhať skondenzovať, začne sa hromadiť a to spôsobí ďalšie zvýšenie tlaku. Veľmi dôležitou súčasťou viacčlenných odpariek je taktiež rekompresia pary, čo je využitie štiavných pár z predchádzajúceho člena na zahustenie roztoku v ďalšom člene. Týmto spôsobom je možné rapídne znížiť prevádzkové náklady, keďže nie je potrebné privádzať čerstvú ohrevnú paru do každého člena odparky, ale čerstvá para sa privedie iba do prvého člena a nasledujúce členy sú vyhrievané štiavnými parami z predchádzajúcich členov. V neposlednom rade je dôležité sledovať zanášanie odparky úsadami z roztoku. Príliš zanesená ohrevná plocha môže zhoršiť prestup tepla natolko, že ohrevná para nebude schopná zahustiť roztok na požadovanú hodnotu. Vo všeobecnosti platí, že roztoky solí, ktorých rozpustnosť sa s rastúcou teplotou nemení (alebo mení iba veľmi málo), zvyknú tvoriť úsady viac, ako roztoky, ktorých rozpustnosť sa s teplotou mení výrazne.