

# ČIERNY LÚH

ELABORÁT

**Juraj Hrstka**

**ZS 2016/2017**

# Obsah

Zoznam literatúry .....	3
Abstrakty zo zdrojov .....	4
Abstrakt.....	7
Rešerš.....	8
Doplnková literatúra .....	16

# Zoznam literatúry

- [1] Ahvenlampi et al.: Energy efficient control techniques in continuous cooking application, *IFAC Proceedings Volumes, Volume 43, Issue 1, 2010, Pages 297-302*
- [2] Lee F.L., Bennington Ch.: Liquor flow in a model kraft batch digester, *Chemical Engineering Journal, Volume 158, Issue 1, 15 March 2010, Pages 51-60*
- [3] Mesfun S., Toffolo A.: Optimization of process integration in a Kraft pulp and paper mill – Evaporation train and CHP system, *Applied Energy, Volume 107, July 2013, Pages 98-110*
- [4] Steinhagen H., Branch C.A.: Heat transfer and heat transfer fouling in Kraft black liquor evaporators, *Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 14, Issue 4, May 1997, Pages 425-437*
- [5] Ferreira D.J.O., Cardoso M., Park S.W.: Gas flow analysis in a Kraft recovery boiler, *Fuel Processing Technology, Volume 91, Issue 7, July 2010, Pages 789-798*
- [6] Berglin N., Berntsson T.: CHP in the pulp industry using black liquor gasification: thermodynamic analysis, *Applied Thermal Engineering, Volume 18, Issue 11, November 1998, Pages 947-961*
- [7] Ferreira E.T.F., Balestieri J.A.P.: Black liquor gasification combined cycle with CO<sub>2</sub> capture – Technical and economic analysis, *Applied Thermal Engineering, Volume 75, 22 January 2015, Pages 371-383*

# Abstrakty zo zdrojov

## **Energy efficient control techniques in continuous cooking application**

Energy efficiency is one of the main aspects in the Kraft pulping process. In Kraft pulping, the delignification of the pulp is mainly controlled by temperature and alkali. However, the quality is usually measured only in the blowline of the digester resulting in a control delay several hours. This affects to the quality control and also the energy efficiency of the plant. In this study, energy efficiency in the continuous Downflow Lo-Solids cooking application is studied using model-based approach. Temperature and alkali controls are considered and some suggestions are proposed.

Keywords: Temperature control, chemical variables control, pulp industry

## **Liquor flow in a model kraft batch digester**

Batch digesters are solid–liquid reactors used to produce chemical pulp from wood chips. The literature shows that the extent of reaction (delignification) varies as a function of chip location in the vessel, with the extent of non-uniformity commonly attributed to poor and/or non-uniform liquor flow through the digester (which causes poor chemical and heat distribution through the chip mass during the cook). Electrical resistance tomography (ERT) was used to evaluate the uniformity of liquor flow in a laboratory scale-model digester (a 1:15 geometrically scaled vessel) with model particles used in place of wood chips (the vessel to particle diameter ratio was 93:1 to minimize wall effects) and close approximation of the liquor superficial velocity and pore Reynolds number. Local flow velocities were also measured for common flow conditions using ERT data and pixel–pixel cross-correlation techniques, with the results compared with computational simulations made using a commercial CFD code. The tomographic data shows that it is possible to create uniform zones in the digester, although a stagnation point exists in the centre of the vessel at the screen level. This point coincides with the location of highest kappa numbers (the lowest extent of reaction) reported in industrial tests. Within the resolution of the tomographic technique local axial flow velocities were found to agree with calculated and computational results. The flow velocity data were used as input to a two-dimensional, mathematical model of reaction within the digester, with the variability of lignin distribution compared to available industrial data.

Keywords: Kraft pulping, Batch digesters, Electrical resistance tomography, Liquor flow uniformity, Computational modelling

### **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

### **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

### **Gas flow analysis in a Kraft recovery boiler**

Demands for optimal boiler performance and increased concerns in lowering emission have always been the driving force in the reevaluation and evolution of the Kraft boiler; specifically the air distribution strategies that are directly related to achieving increased residence time of flue gas combustion inside the furnace which in turn lowers atmosphere emission levels and enhances boiler operation. This paper presents the results of a study that analyzes the interaction of the different multilevel air injections have on flue gas flow patterns including various quaternary air supply arrangements. Additionally, this study assesses the performance of the CFD (Computational Fluid Dynamics) model against data available in literature. Simulations were performed considering isothermal and incompressible flows, and did not take into account thermal phenomena or chemical reactions. The numerical solutions generated proved to be coherently related to the data available in literature, and provided proof of the efficiency of tertiary level air injection, as well as revealed that quaternary air injection ports arranged in a symmetrical configuration is most suitable for optimal equipment operation.

Keywords: Computational fluid dynamics, Kraft recovery boiler, Air supply arrangements, Flue gas flow, Quaternary air arrangements

### **CHP in the pulp industry using black liquor gasification: Thermodynamic analysis**

Black liquor supplies the major share of the energy used in the production of chemical kraft pulp, the dominant pulping process worldwide. Traditionally, black liquor, which contains dissolved organic and inorganic substances from pulping, is recycled to a recovery boiler that performs the dual function of recovering chemicals and energy. Gasification of the black liquor as an alternative to the conventional recovery system is under intense development, because it offers potential advantages in both functions. The realization of the energy recovery potential of black liquor gasification is strongly connected to changes in the pulp mill's system for cogeneration of heat and electric power. In this work, pinch analysis of the integrated gasification cogeneration system, is used to identify systems which maximize power and heat yield under given process constraints and before considering integration with the mill.

Keywords: Black liquor, Process integration, Gasification, Pulp, Cogeneration

### **Black liquor gasification combined cycle with CO<sub>2</sub> capture – Technical and economic analysis**

The pulp and paper sector is intensive in the use of energy, and presents a high participation in the industrial context, specially based in the black liquor, a renewable source generated in the pulp process. Black liquor gasification is not still completely dominated; however, it has the potential of becoming an important alternative for the pulp and paper sector. In this article, the traditional steam cycle based on chemical recovery and biomass boilers associated to backpressure/extraction turbine is compared to black liquor gasification combined cycle schemes, associated to biomass boiler, considering the technical and economic attractiveness of capturing and sequestering CO<sub>2</sub>. Results show that despite its interesting exergetic efficiency, the adoption CO<sub>2</sub> capture system for BLGCC did not prove to be attractive under the prescribed conditions without major incentive.

Keywords: Cogeneration, Black liquor gasification, Combined cycle, Exergetic analysis, CO<sub>2</sub> capture

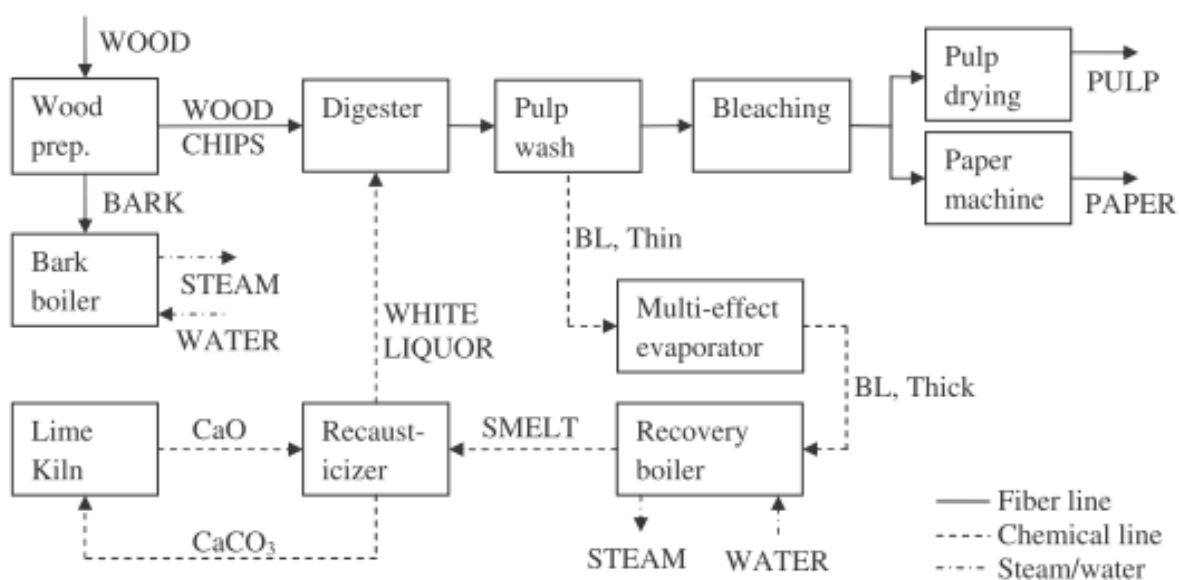
# Abstrakt

Čierny lúh je neodmysliteľnou súčasťou tvorby buničiny s obrovským ako energetickým potenciálom, tak potenciálom pre regeneráciu chemikálií. Práca je súhrnom akademických článkov, ktoré sa venujú čiernemu lúhu z každého aspektu, a môže slúžiť ako základ pri literárnom rozbere problematiky pre budúcich študentov zaoberajúcich sa touto témou v rámci diplomovej práce. Elaborát pojednáva o chémii vzniku čierneho lúhu, o možnostiach riadenia procesu drevnej štiepky, ako aj vplyve charakteru toku na mieru delignifikácie priamo vo varáku. Patričná časť tejto práce sa venuje zahusťovaniu čierneho lúhu v odparkách, so zameraním na možnosti úspor energetických médií, študovaním podmienok prestupu tepla a zanášaniam teplovýmenných plôch. V poslednej časti je opísaný chod regeneračného kotla, kde sa čierny lúh spaľuje a takisto boli spracované aj články, ktoré analyzujú nahradenie tradičnej regenerácie cyklom zahŕňajúcim splyňovanie čierneho lúhu, pričom sa zameriavajú aj na dôkladný ekonomický rozbor.

**Keywords:** Black liquor, Kraft evaporator, Fouling, Gasification

# Rešerš

Kraft proces jedným z najrozšírenejších procesov tvorby buničiny z dreva, či drevnej štiepky. Tento produkt sa skladá takmer výlučne z celulóзовých vlákien, ktoré sú hlavnou zložkou papiera. Bol patentovaný v roku 1884, pričom prvá prevádzka na výrobu papiera touto cestou bola spustená v Švédsku v 1890. V 30-tych rokoch minulého storočia zdokonalil pán Tomlinson celý proces pridaním regeneračného kotla, vďaka čomu aj dnes tento proces dominuje vo papierenskom svete. Na Obr. 1 [3] možno vidieť, o aký komplexný proces sa jedná, a preto sa tento elaborát zameriava len na jeden z mnohých procesných prúdov - čierny lúh, pričom je práca rozdelená logicky podľa cesty čierneho lúhu naprieč prevádzkou.

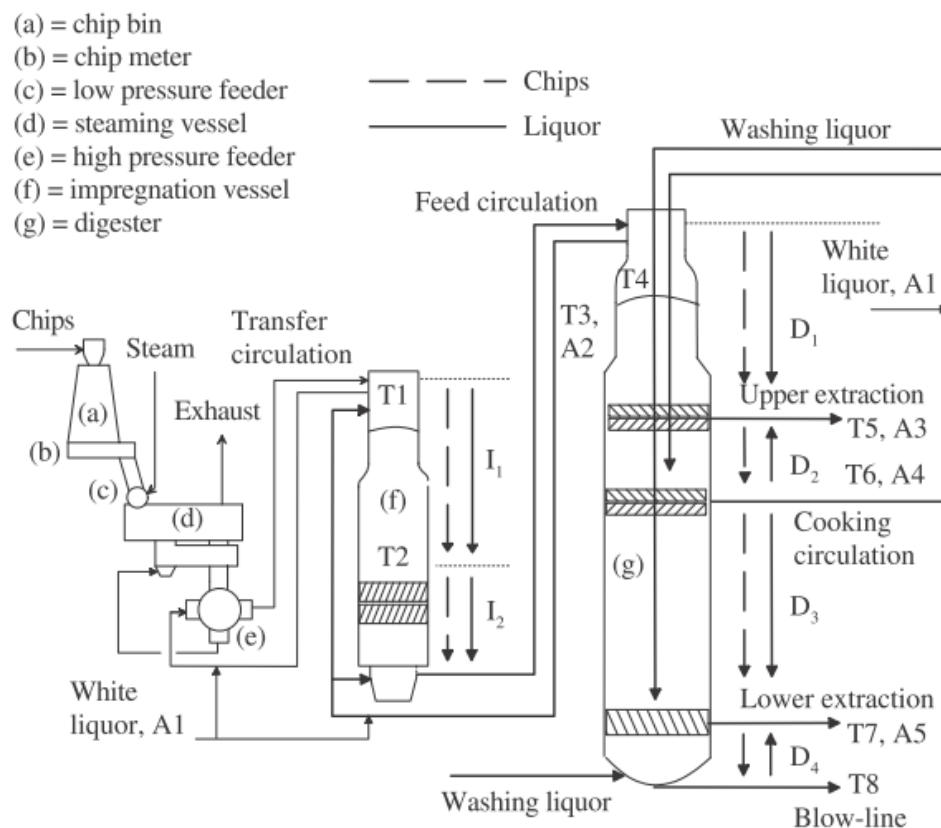


Obr 1 Kraft proces

Čierny lúh je látka bezprostredne spojená s procesom varenia drevnej štiepky a výroby papiera. Je to mnohozložková alkalická zmes tvorená vodou, anorganickými soľami ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a iné) a organickými látkami – hlavne zbytkami lignínu, sacharidmi a polysacharidmi. V papierenskom závode je spracovaný vo viacerých prevádzkach, v ktorých vzniká, zahusťuje sa, alebo je energeticky zhodnotený. Samotný čierny lúh vzniká vo varákoch drevnej štiepky. Nadrvená drewná biomasa je vedená do kontaktu s parou, kde dochádza ku odstráneniu časti vzduchu zo štiepky, aby impregnácia v ďalšom kroku prebehla efektívne. Čiastočne odvzdušnená biomasa prichádza do impregnačnej nádoby, kde je impregnovaná silne zásaditým bielym a recyklovaným čiernym lúhom. Vysoká hodnota pH je pre proces delignifikácie kľúčová. Lignín je tvorený z komplexných organických polymérov



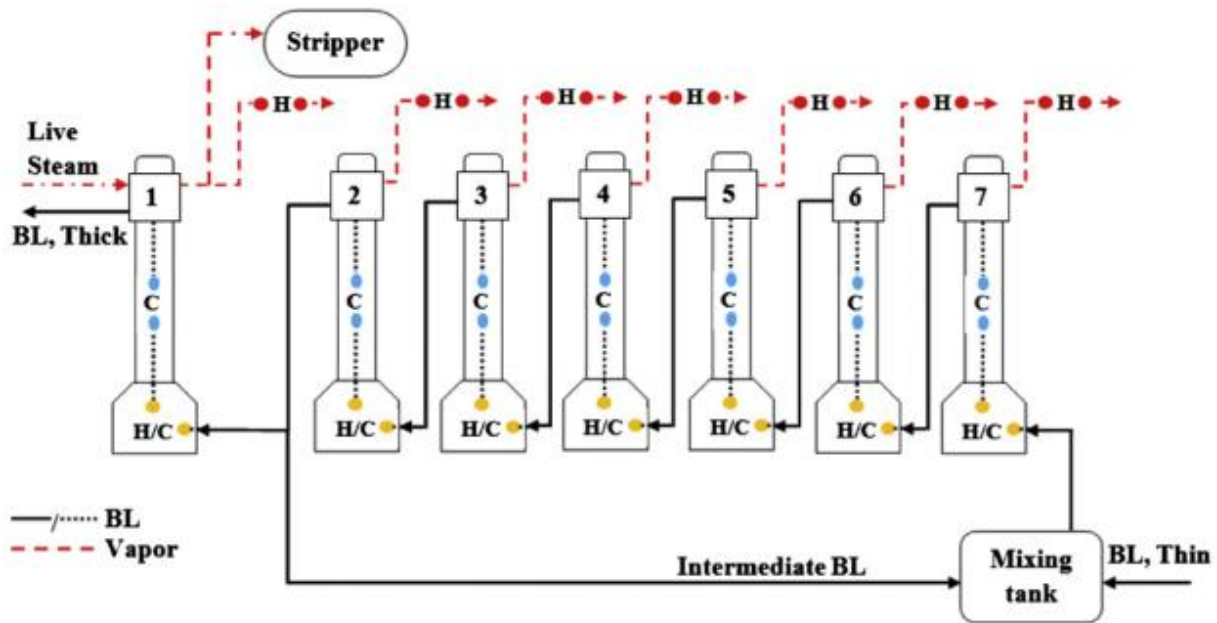
a v dreve slúži ako spojivo vlákien celulózy. Preto je potrebné ho v ďalšom kroku, v procese varenia štiepky, odstrániť za zvýšenej teploty a tlaku. Do varáku sa privádza čerstvý biely lúh, ktorý zabezpečuje okrem pH aj homogenitu prúdenia a rozloženia reakcií v zariadení. Ten sa prechodom cez varák postupným rozpúšťaním látok zo štiepky mení na tzv. čierny lúh, pričom časť sa vedie do impregnačnej nádoby a väčšina opúšťa varák bočnými odťahmi, viď Obr. 2 [1]. Oba lúhy majú zabezpečiť varáku jednotné podmienky prestupu tepla a látky a preto je bežné, že tieto lúhy sú pred odťahom recirkulované. S procesom varenia sa v papierenskom priemysle spája tzv. *Kappa číslo*, ktoré predstavuje „bieliteľnosť“ buničiny a indikuje množstvo zvyškového lignínu, pričom sa stanovuje analyticky pomocou  $KMnO_4$  [19]. Tvorená buničina je väčšinou neuniformná, pričom všeobecne platí, že čím sme bližšie ku stredu, tým je Kappa číslo väčšie. Preto ideálnym stavom je rovnaký časový priebeh teploty a koncentrácie pre každú drevenú čiastočku, čo vedie ku skráteným dobám varenia, vylepšeniu stability a regulovateľnosti a zníženým spotrebám chemikálií pri procese bielenia buničiny [2]. Lee a kol. vo svojej práci [2] laboratórne skúmali uniformitu buničiny, pričom ich experimentálne výsledky porovnávali s výsledkami komerčnej CFD simulácie. Namerané a spracované dáta ukazujú, že uniformné zóny môžu byť vo varáku vytvorené a kvalitatívne vysvetľujú miesto buničiny s vysokým Kappa číslom namerané priemyselnými experimentami v strede toku. Na vytvorenie rýchlostného profilu lúhu však táto analýza nie je dostatočne presná.



Obr. 2 Schéma varáku drevnej štiepky, odťahy lúhu sú označované ako extraction

Pre matematický opis rýchlosti delignifikácie sa používa jednoduchý model, ktorý predpokladá, že rozkladná reakcia sa dá opísať jednou všeobecne platnou rovnicou, ktorá je funkciou len času a teploty. Takáto predikcia sa nazýva *H-faktor*. Hlavnou riadiacou premennou kvality buničiny je miera zásaditosti, ktorú zabezpečuje prídavok bieleho lúhu. Ten je pridávaný vo viacerých miestach v procese. V reálnych prevádzkach býva často celý proces delignifikácie riadený Kappa číslom a *H-faktorom* [1]. Pre rozdiel medzi vypočítaným a nastaveným Kappa číslom pre daný H-faktor sa doladuje teplotný profil vo varáku pomocou riadenia prietoku bieleho lúhu. Nevýhodou však je nehomogénny charakter drevnej štiepky a potreba viacerých *H-faktorov*, keďže, ako je uvedené vyššie, miera delignifikácie prebieha rôznymi rýchlosťami. Riadenie zásaditosti je nutné, pretože sila (alkalita) bieleho lúhu častokrát kolíše aj o 5%, a teda v zmysle zachovania kvality buničiny je nutné zachovať mieru zásaditosti. Často sa stanovuje laboratórnymi meraniami, čo je veľmi neefektívne, samozrejme sa odporúča online analyzátor vyhodnocujúci kvalitu bieleho lúhu kontinuálne. Takisto treba dať pozor na zvyškové koncentrácie zásaditých solí. Ak je moc nízka, lignín sa začne zrážať a buničina je ťažko spracovateľná v procese bielenia. Ak je, naopak, na začiatku varenia táto koncentrácia vysoká, celulóza sa rozkladá čo znižuje výťažok a zvyšuje spotrebu chemikálií.

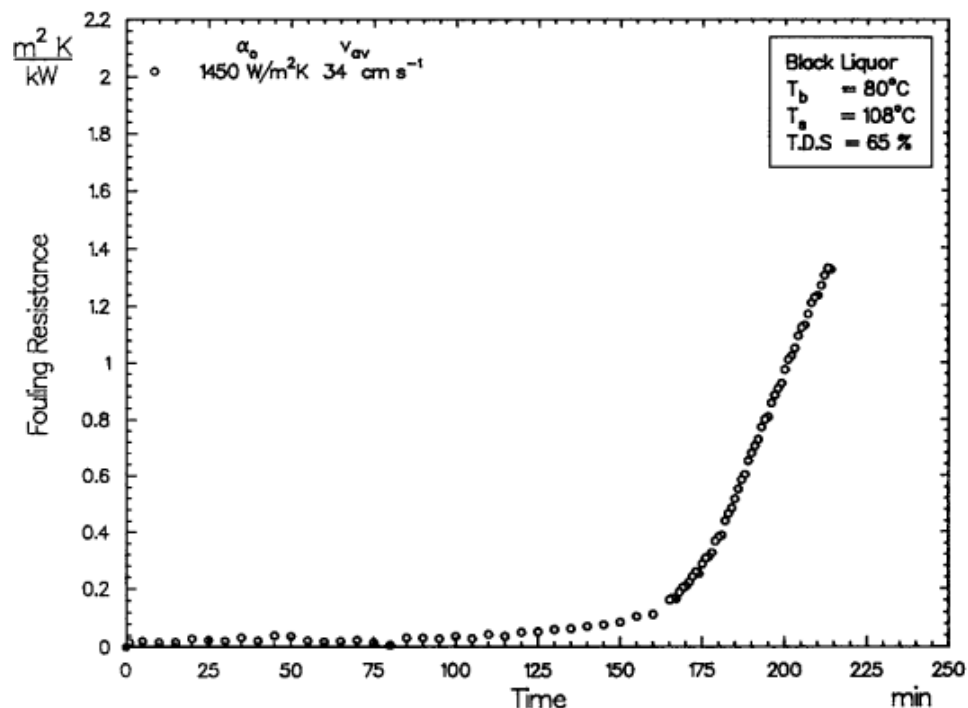
Bežné koncentrácie sušiny v čiernom lúhu opúšťajúcom varák sú 15-18 % hm. Ak však chceme čierny lúh ďalej energeticky zhodnotiť a zregenerovať už použité chemikálie, je potrebné ho zahustiť ho koncentráciu sušiny približne 75% hm. Z tohto dôvodu je neodmysliteľnou súčasťou papierenského závodu pracujúceho na základe Kraftovho cyklu odparka čierneho lúhu. Z dôvodu veľkých objemových prietokov zahusťovaného čierneho lúhu je dobré použiť viacstupňové kaskádové zariadenie. Existuje mnoho konfigurácií [17], väčšinou sa však využíva kaskáda 6 a viac odparovacích telies, kde sa čierny lúh privádza vo forme stekajúceho filmu po teplovýmenej ploche a na druhej strane tejto plochy kondenzuje ohrevná para. Čerstvá stredotlaková para je jediným vstupným energetickým médiom do prevádzky (ak neuvažujeme elektrickú energiu potrebnú na pohon čerpadiel) a je privádzaná do stupňa s najvyššou mierou zahustenia, preto sa jedná o protiprúdne zapojenie z pohľadu čierneho lúhu a čerstvej pary, resp. bridových pár v jednotlivých odparovacích stupňoch, ako vidno na Obr. 3 [3]. Argumentom v prospech takéhoto zapojenia je aj fakt, že so zvyšujúcou sa teplotou narastá aj teplota varu roztoku (tzv. boiling point rise) [17] a v krajných situáciách by mohlo dôjsť ku nedostatočnej hnacej sile v telesách s najväčšou mierou zahustenia.



Obr. 3 Protiprúdne zapojenie odparky čierneho lúhu so 7 stupňami

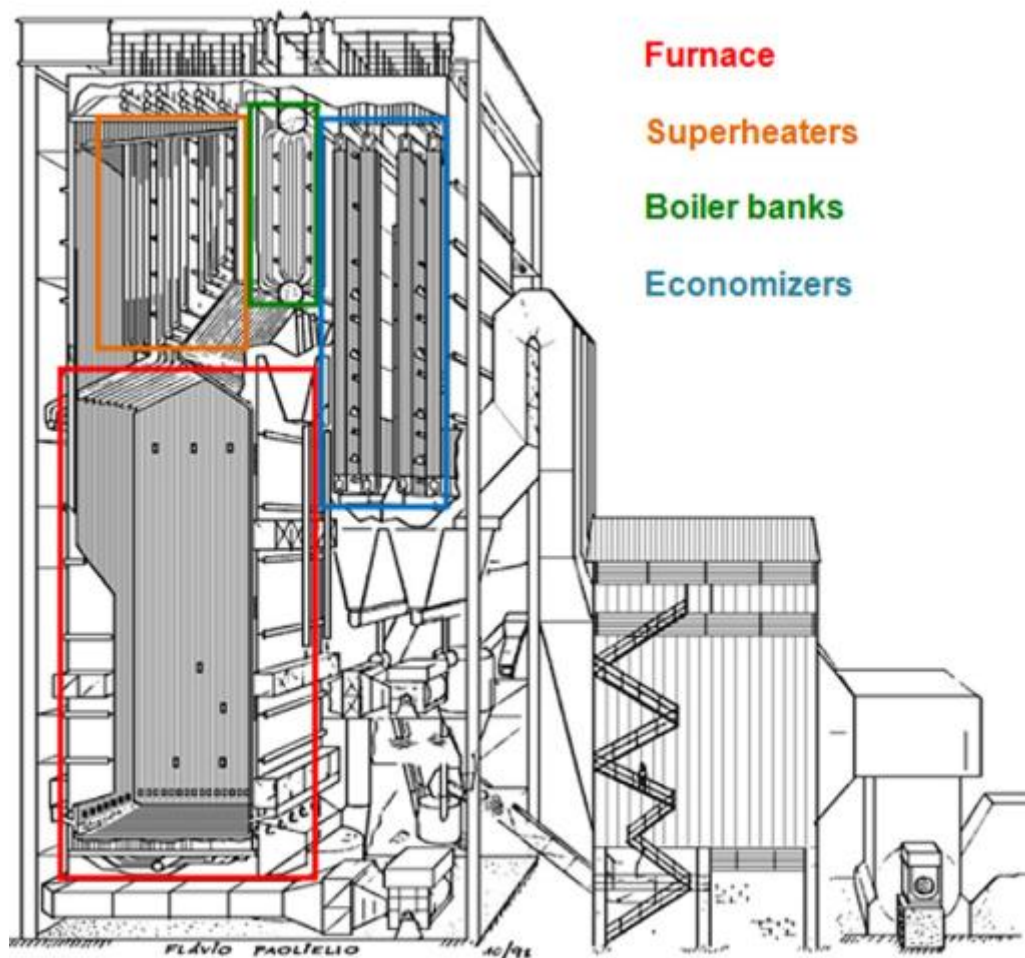
Mesfun a kol. [3] pojednáva o možnostiach redukcie spotreby čerstvej pary pre rovnaký stupeň zahustenia. Poukázal, že pôvodná konfigurácia reálne inštalovanej odparky vo forme kombinácie protiprúdneho a súprúdneho zapojenia má úzke miesto v podobe výmenníka tepla využívajúceho externý zdroj tepla medzi tretím a siedmym stupňom, a preto navrhuje prakticky protiprúdne (aj keď sám autor sa k takému pomenovaniu v práci neprikláňa) zapojenie s recyklom časti čierneho lúhu z druhého stupňa na stabilizáciu koncentrácie sušiny na vstupe. Pre takéto usporiadanie bola vykonaná aj optimalizácia v zmysle zníženia spotreby čerstvej pary, pričom optimalizovanými premennými boli tlakové úrovne a koncentračný profil v jednotlivých členoch odparky. Po dôkladnom uvážení optimalizačného princípu vybrali autori metódu GeDEM (details o samotnej metóde nechávam na samoštúdium čitateľa), pričom sa autorom podarilo znížiť celkovú spotrebu tepla o 21% oproti pôvodnému stavu. Preto, pokiaľ je možné hýbať s tlakovými úrovňami, a dodržíme technologicky stanovené pracovné intervaly koncentrácií sušiny v jednotlivých členoch odparky, optimalizácia môže byť z energetického hľadiska veľmi užitočná. Dôkladná pinch analýza navyše ukázala a potvrdila, že ku nižším spotrebám čerstvej pary je možné dospieť aj vyvážením tepelných tokov v členoch odparky, ktoré, ako je ukázané v práci, môžu byť v pôvodných návrhoch rozložené nerovnomerne. Autori v závere poukazujú na fakt, že významnejší vplyv na úsporu médií má zmena procesných parametrov a prevádzkovania, nie zmena konfigurácie odparovacích telies.

Jedným z úskalí chemicko-inžinierskeho opisu odparky je stanovenie úhrnného koeficientu prestupu tepla v odparovacom telese. Ten súvisí s hydrodynamickým režimom na strane čierneho lúhu v telese a problematické je takisto zistiť všetky fyzikálno-chemické vlastnosti čierneho lúhu potrebné do kritériálnych rovníc. S postupným zahusťovaním súvisí aj zvýšená náchylnosť ku zanášaniam teplovýmenných plôch v stupňoch s vyššími koncentraciami čierneho lúhu. Obojím vyššie uvedeným problémom sa venuje Steinhagen a Branch vo svojej práci [4], kde skúmali mieru zanášania pre dva rôzne typy odparovacích telies; tradičné vertikálne so stúpajúcim filmom po povrchu (rising film) a modernejšie, už spomínané telesá so stekajúcou vrstvou filmu. Práca poukazuje na ďalšie možné konfigurácie odparovacích jednotiek používaných v priemyselnej praxi, preto odporúčam nazrieť na schémy v článku. Ďalším prínosom práce je pojednanie o úhrnnom koeficiente prestupu tepla  $U$ . Vo všeobecnosti možno tvrdiť, že s rastúcou koncentraciou sušiny v čiernom lúhu klesá hodnota úhrnného koeficienta. Autori poukazujú na dva tepelné režimy: a) režim konvekčívneho prestupu tepla a b) režim varu pred dosiahnutím kritického bodu (nukleátový var). Tie závisia od množstva dodávaného tepla do systému, pričom v prvom prípade je hodnota  $U$  najväčšmi ovplyvňovaná rýchlosťou prúdenia. V druhom režime je z grafov vidno jasnú závislosť  $U$  od tepelného toku. S varujúcou koncentraciou sušiny sa najviac mení viskozita tohto roztoku, čo komplikuje získanie podkladov pre kritériálne rovnice, autorom sa však podarilo overiť štandardnú hodnotu exponentu 0,33 pre v člene  $(Nu/Pr)^n$ . Nakoniec autori skúmajú  $U$  pre rôzne hydrodynamické režimy. Obr. 4 [4] predstavuje krivku zanášania, ktorá má klasický priebeh – po prekročení kritického času rastie odpor usadenej vrstvy exponenciálne.



Obr. 4 Krivka zanášania teplovýmenných plôch v odparovacom telese

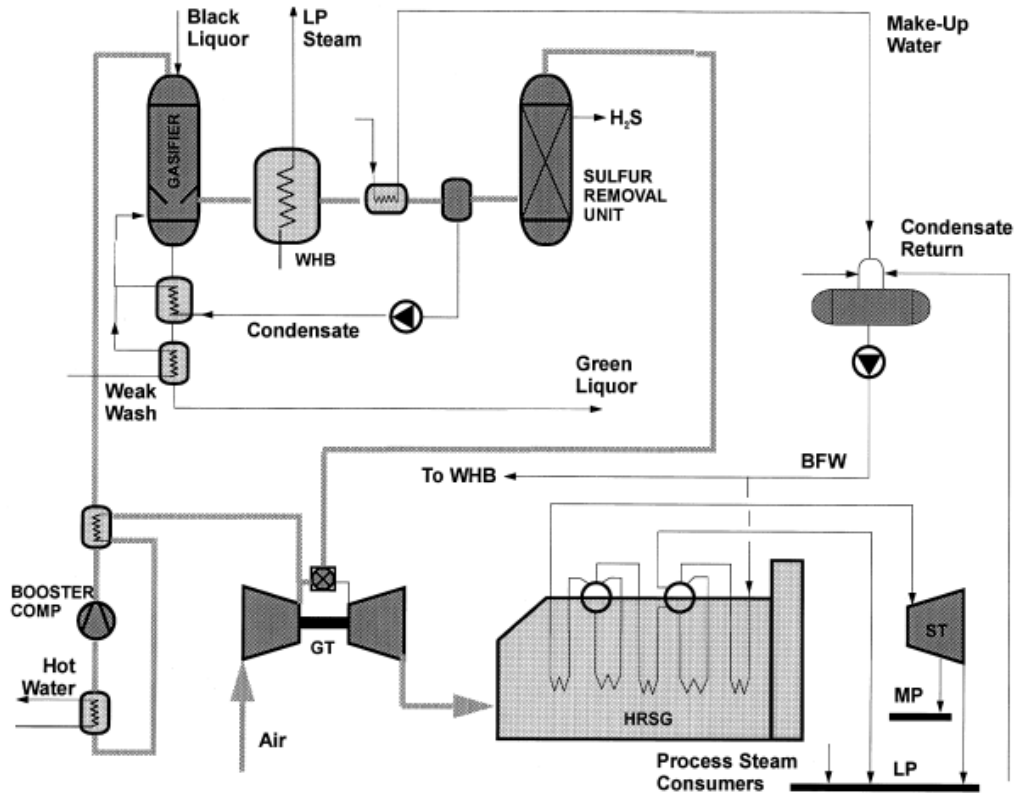
Z hľadiska problémov spojených so zanášaním autori dospeli ku viacerým záverom. Logickým je skutočnosť, že pri silne zahustenom čiernom lúhu je miera deponácie omnoho rýchlejšia, než pri zriedených roztokoch. Nárast povrchovej teploty ohrevnej plochy vplýva pozitívne na rýchlosť zanášania, no rýchlosť prúdenia, ako ukázali experimenty, nijako tento proces neovplyvňujú. Zaujímavým záverom je zjavná závislosť miery zanášania od režimov výmeny tepla uvedených vyššie. Možnosti redukcia tohto nechceného javu tkvejú v chemickej úprave čierneho lúhu, k čomu sú však potrebné laboratórne merania osobitné pre bežné zloženie čierneho lúhu v danej prevádzke. Špecialita v podobe teflónového navrstvenia teplovýmenných plôch sa ukázal ako neefektívna. Pre experimentálne podmienky použitím doskového výmenníka tepla nezaznamenali v priebehu 24h žiadne zanášanie (naproti predošlému experimentálnemu zariadeniu), avšak scale-up takéhoto typu výmenníka aj s predpokladanou mierou zanášania je otáznym. V jednotkách s najvyššími koncentraciami sušiny je bežná zmena konfigurácie toku čierneho lúhu, čím čiastočne dochádza ku redukovaniu úsad.



Obr. 5 Zjednodušený náčrt regeneračného kotla

Čierny lúh opúšťa odparku o koncentrácii sušiny približne 75% hm. a je pripravený na energetické zhodnotenie a regeneráciu chemikálií v regeneračnom kotle. Tento kotol, ktorý už samotný generuje vysokotlakovú prehriatu paru pozostáva zo samotnej pece a doplnkových zariadení, vid' Obr. 5. Vzduch sa do tohto zariadenia privádza cez vstupy na štyroch úrovniach, pričom každá má svoju špecifickú úlohu v kotle [5]. Primárna na spaľovanie čierneho lúhu, sekundárna (do kríža privádzaná) na lepšie premiešavanie spalín, terciárna dodáva doplnkový kyslík a zmierňuje turbulencie vznikajúce kvôli sekundárnemu prívodu, čím proces stabilizuje. Kvartérna sa používa vo väčších kotloch a je umiestnená na výstupe – zvyšuje zdržný čas, zlepšuje recirkuláciu spalín, reguluje teplotný profil a hlavne dokáže zredukovať emisie NO<sub>x</sub> o polovicu (zdroj 8 z daného článku). Ferreira a kol. venovali možnostiam prúdenia ofukovacieho vzduchu do priestorov kotla komplexnú CFD analýzu [5], ktorú porovnali s teóriou a navrhujú najefektívnejšie konfigurácie pre vstupy spaľovacieho vzduchu.

Pomerne novým konceptom je nahradenie spaľovacieho zariadenia splyňovacím reaktorom, čím by sa z tejto jednotky stala kombinovaná výrobná tepla a elektrickej energie (CHP – combined heat and power production). Základnými prvkami takejto jednotky je splyňovač, plynová turbína, systém na využitie tepla s výrobou pary (HRSG – heat recovery steam generation) a zariadenie na odstraňovanie sírnych zlúčenín, vid' Obr. 6 [6].



Obr. 6 Schéma jednotky so splyňovacím cyklom

Splyňovanie môže prebiehať v širokom teplotnom intervale, väčšinou buď nad alebo pod teplotou topenia anorganických solí. Pri nižšej teplote vo fluidnej vrstve je výhodou separácia solí v tuhom skupenstve, nevýhodou však je pomalšia rýchlosť reakcií. Preto vzniká potreba väčšieho zariadenia a takisto treba uvažovať s navýšeným množstvom zlúčenín síry v plynnom skupenstve. Pre režim vyšších teplôt obsahuje plynný produkt menej síry je nižšia ale reakcie prebiehajú rýchlejšie, teda stačí menšie zariadenie, kratšia zdržná doba. Roztopené soli však majú korozívne vlastnosti [6].

Koncentrovaný lúh sa nastrekuje na vrch splyňovača spolu s oxidovadlom. Sušenie, pyrolýza a splyňovanie prebiehajú pri procesnej teplote za skoro adiabatických podmienok, pretože exotermické oxidačné reakcie vyvažujú tepelný efekt endotermických - splyňovacích. Teplota sa reguluje prietokom vzduchu, alebo čistého kyslíka. Plyn treba odsíriť v absorpčnej kolóne pri teplotách rádovo v desiatkach °C, preto odovzdá väčšinu tepla vo WHB (waste heat boiler). Očistený plyn sa spaľuje v plynovej turbíne, ktorá generuje elektrickú energiu. [6].

Ferreira a kol. [7] sa venujú hlbšiemu porovnaniu integrovaného splyňovacieho cyklu ku konvenčným regeneračným kotlom. Pre bližšie nešpecifikovanú brazílsku papiereň s produkciou 1000 ton papiera denne uvádzajú, že pri súčasnej konfigurácii je potrebné z celkovej spotreby 60 MW importovať 22 MW elektrickej energie z externého zdroja. V prípade zapojenia autormi navrhovaného cyklu sa úplne eliminuje import elektrickej energie. Z importéra EE sa teda stáva exportér, no treba podotknúť, že tento prípad uvažuje kondenzačnú turbínu miesto protitlakovej, pričom počíta s navýšeným množstvom spálenej biomasy v inej časti závodu (kotel na drevný odpad). V práci autori rozlišujú, či sa v splyňovacom cykle nachádza jednotka na čistenie a spracovanie CO<sub>2</sub> alebo nie. V prípade jej absencie autori stanovili pomocou simulačného softwaru 100 MW nadbytok EE pri tepelnej účinnosti 34%, ak sa s čistiacou jednotkou uvažuje, nadbytok EE predstavuje 74,1 MW s tepelnou účinnosťou 28%. Autori vypracovali detailnú ekonomickú analýzu, z ktorej vyplynuli miery návratnosti viac ako 4 roky, čo je z hľadiska investície vnímané skôr negatívne ako pozitívne.

Ako vidno z predošlého textu, na čierny lúh sa dá pozerať z mnohých chemicko-inžinierskych aspektov. Možno študovať jeho vznik vo varákoch, proces zahusťovania v odparke, či jeho energetické zhodnotenie v regeneračnom kotle alebo splyňovači. Čierny lúh predstavuje veľmi významný zdroj energie z biomasy, na odhadovanej úrovni 3 EJ globálne [6]. V USA je dokonca zdroj tepla jeho spaľovaním najväčší spomedzi všetkých procesných medziproduktov vrátane iných odvetví. Preto je veľmi dôležité hľadať spôsoby, ako toto energetické zhodnotenie prevádzkovať čo najefektívnejšie. V minulosti sa výskumu na túto tému nevenoval prílišná pozornosť, situácia dnes je však, hlavne z vyššie uvedených dôvodov, diametrálne odlišná.

# Doplnková literatúra

- [8] Naqvi M., Yan J., Dahlquist E.: Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 21, November 2010, Pages 8001–8015
- [9] Cardoso M., de Oliveira É.D., Passos M.L.: Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills, *Fuel*, Volume 88, Issue 4, April 2009, Pages 756–763
- [10] Bremford D., Miiller-Steinhagen H. M.: Multiple Evaporator Performance for Black Liquor I: Simulation of Steady State Operation for Different Evaporator Arrangements. *APPITA J.* 47(4), Pages 320-326, 1994
- [11] Näsholm A.-S., Westermark M.: Energy studies of different cogeneration systems for black liquor gasification, *Energy Conversion Management* 38, 1997, Pages 1655-1663
- [12] Ji X., Lundgren .J, Wang C., Dahl .J, Grip C.-E.: Simulation and energy optimization of a pulp and paper mill – evaporation plant and digester, *Applied Energy*, 2012 , 97:30–7
- [13] Khanam S., Mohanty B.: Energy reduction schemes for multiple effect evaporator systems, *Applied Energy*, 2010, 87:1102–11
- [14] Chen F., Gao Zh.: An analysis of black liquor falling film evaporation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 47, Issues 8-9, April 2004, Pages 1657-1671

## Iné

- [17] Grace TM.: Chemical recovery in alkaline pulping processes, *Atlanta: TAPPI Press, 1985*
- [18] Bryce JRG. In: Casey JP, editor, *Pulp and paper chemistry and chemical technology, 3rd ed., New York: John Wiley and Sons, 1980*
- [19] T-236.pdf dokumentácia (dodaná v prílohe)