

CUKROVARNICKÁ TECHNOLOGIE – DÍL XIV.

Výroba páry

SUGAR TECHNOLOGY – STEAM PRODUCTION

Zdeněk Bubník, Svatopluk Henke, Simona Gillarová, Pavel Kadlec
Vysoká škola chemicko technologická v Praze

Výroba cukru se vyznačuje vysokou spotřebou páry a energie. Pára se vyrábí v parních kotlích v kotelně. Elektrická energie se v cukrovaru vyrábí pomocí parních turbín spojených s generátorem. Zdrojem paliva pro parní kotle jsou nejčastěji zemní plyn, bioplyn, uhlí, topné oleje, biomasa či jejich kombinace.

Řepný cukrovarnický průmysl za posledních 50 let zlepšil svou energetickou účinnost z 250–300 kWh·t⁻¹ řepy na 170 kWh·t⁻¹ pro dobře fungující provozy bez započítání energie na sušení řízku, vyžadující v případě bubnové sušárny dalších 98 kWh·t⁻¹ řepy, výsledně tedy 268 kWh·t⁻¹ řepy. Spotřeba elektrické energie se pohybuje v rozsahu 17–30 kWh·t⁻¹ řepy (1).

Hlavními spotřebiči páry jsou zahříváče, odpařovačky, zrnice a sušárny. Pára se tak v cukrovaru využívá ke třem účelům: k výrobě elektrické energie, k vícestupňovému odpařování v odparce s následným využitím brýdových par pro technologické náhřevy a k sušení řízku a cukru. Na obr. 1. je uvedeno základní schéma toku páry (2–3), detailní parní schéma cukrovaru uvádí obr. 2.

Výroba páry a elektrické energie

V cukrovaru se vyrábí pára a elektrická energie v tepelně energetické centrále, která se skládá z kotleny a turbogenerátoru (obr. 3. a 4.).

V parních kotlích se vyrábí přehřátá vodní pára, která je hlavním médiem přenášejícím teplo (obr. 5.). Přehřátá pára (ostrá) vzniká v kotli dalším ohřevem nasycené páry, vzrůstá tak její teplota. Průchodem páry turbogenerátorem (dříve parním strojem) vykoná pára technickou práci a vyrobí elektrickou energii. Pára odcházející z turbíny se nazývá vratná neboli returnní. K výrobě elektrické energie se obvykle použijí přibližně dvě třetiny ostré páry z kotle. Zbýlý podíl ostré páry se používá

k termokompresi, sušení a malá část vstupuje do redukční stanice. Zde dochází ke snížení jejího tlaku a vzniká tak redukováná pára, která se mísí s returnní párou, sytí a chladí pro potřeby páry vhodné k použití na odparce. Množství a kvalita redukové páry se navrhuje tak, aby celkové množství páry pro odparku bylo postačující. V některých případech není redukce tlaku páry nutná. Zvlhčování páry se provádí proto, že suchá pára má horší přestup tepla než pára nasycená. Pro napájecí vodu do kotle se používají kondenzáty z 1. a 2. tělesa odparky. Tyto kondenzáty z obou těles je nutno kontrolovat na přítomnost sacharosy z hlediska možnosti přestřiku šťávy, která se do nich dostane společně s brýdovou párou. Kondenzáty vrácené do kotleny je rovněž nutné pravidelně kontrolovat na přítomnost sacharosy.

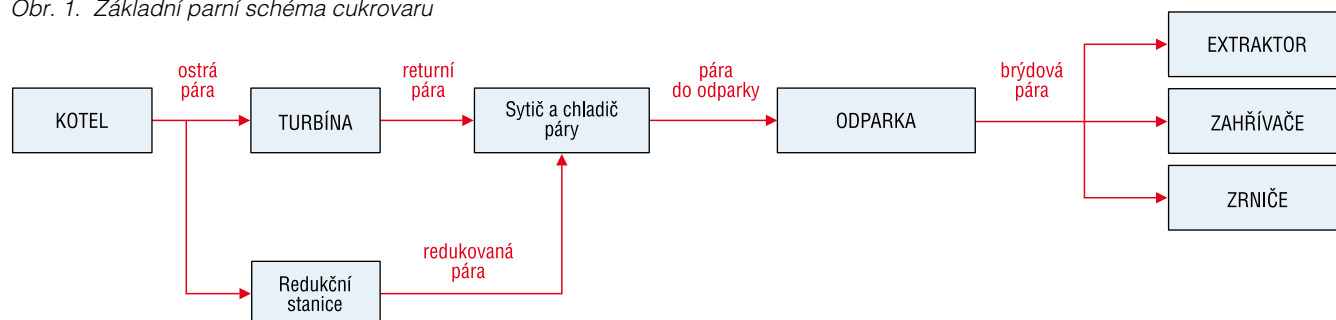
Základní vztahy na úseku výroby páry

Účinnost výroby páry závisí především na typu a stavu kotlů v kotelně, používaném palivu a přebytku vzduchu ve spalovacím procesu. Účinnost kotle lze stanovovat více metodami, stanovení účinnosti nepřímou metodou vychází z úvahy, že teoretická účinnost ideálního kotle (100 %) je u reálného zařízení (kotle) snížena o jednotlivé ztráty Z_i (%):

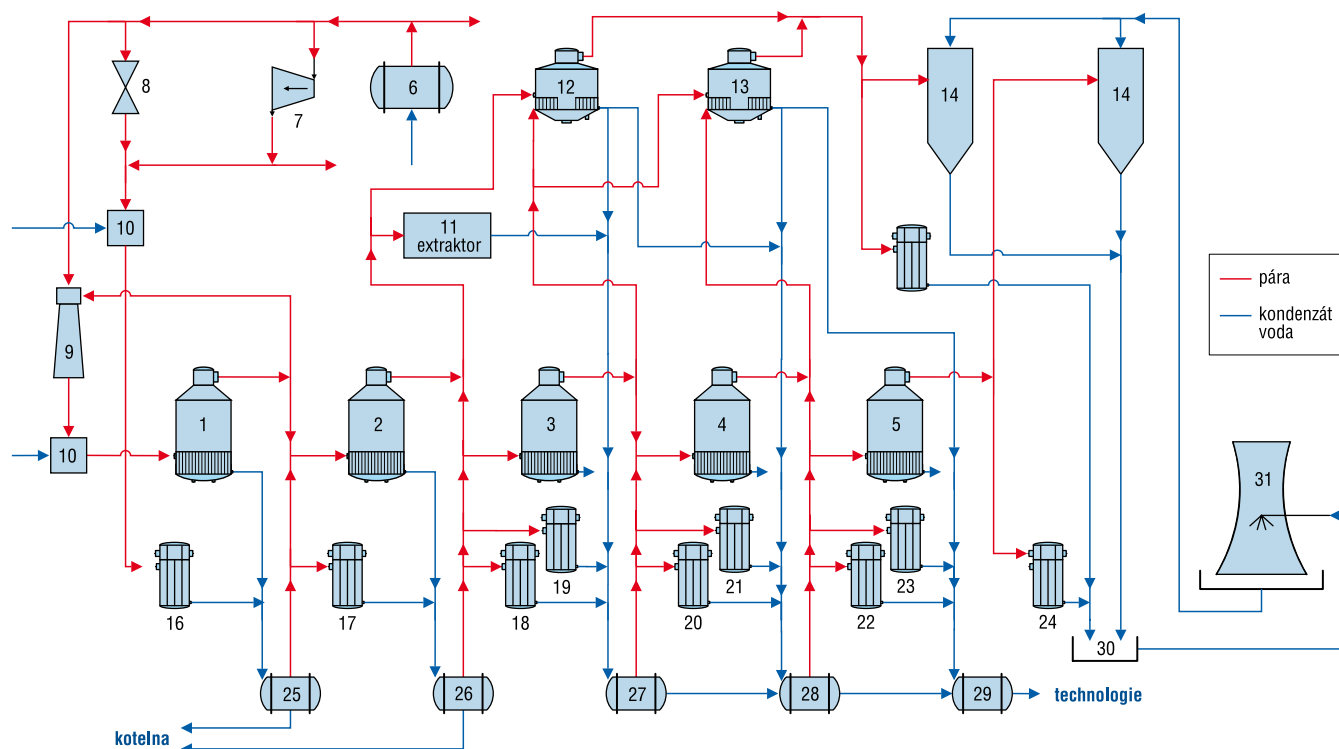
$$\sum_i Z_i = Z_c + Z_{co} + Z_f + Z_k + Z_{sv} \quad (1)$$

kde Z_c je ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích v %, Z_{co} je ztráta způsobená únikem hořlaviny ve spalínách v %, Z_f je ztráta způsobená únikem tepla v tuhých zbytcích v %, Z_k je ztráta způsobená únikem tepla ve spalínách (komínová ztráta) v % a Z_{sv} je ztráta způsobená odevzdáním tepla do okolí, tj. ztráta tepla způsobená přestupem tepla sáláním a vedením v %.

Obr. 1. Základní parní schéma cukrovaru



Obr. 2. Parní a kondenzátové schéma cukrovaru (3)



1, 2, 3, 4, 5 – tělesa odparky, 6 – parní kotel, 7 – turbogenerátor, 8 – redukční stanice, 9 – termokompresor, 10 – sytič a chladič páry, 11 – extraktor, 12 – zrna 1. cukroviny, 13 – zrna zadinové cukroviny, 14 – barometrická kondenzace, 15 – zahříváč surové šťávy, 16 – zahříváč před odparkou (3. stupeň), 17 – zahříváč před vyvážkou zahříváč před odparkou (2. stupeň), 18 – zahříváč před odparkou (1. stupeň), 19 – rezervní zahříváč, 20 – vyvážka, 21 – zahříváč před vyvážkou, 22 – zahříváč před 2. saturací, 23 – zahříváč před čením, 24 – zahříváč surové šťávy, 25 – sborník kondenzátů z topné páry, 26 – sborník kondenzátů z 1. brýdové páry, 27 – sborník kondenzátů z 2. brýdové páry, 28 – sborník kondenzátů z 3. brýdové páry, 29 – sborník kondenzátů z 4. brýdové páry, 30 – nádrž na barometrickou vodu, 31 – chladič věž

Komínová ztráta je při standardním provozu kotle rozhodující pro výslednou účinnost (je obvykle největší ze všech ztrát) a vyjadřuje ztrátu tepla ve spalinách za kotlem (přesněji za poslední teplosměnnou plochou). Toto odcházející teplo již nelze dále využít a odchází komínem do ovzduší.

Komínová ztráta podle Siegerta

$$Z_k = K_1 \frac{t_{sp} - t_{vz}}{\phi_{CO_2}} \quad (2),$$

kde K_1 je konstanta dle druhu paliva (tab. I. a II.), t_{sp} je teplota

Obr. 3. Tepelně energetická centrála: parní kotel (3)



spalin na výstupu z kotle ve °C, t_{vz} je teplota vzduchu na vstupu do kotle ve °C a φ_{CO_2} je obsah CO_2 ve spalínách v % obj.

Komínová ztráta dle rakouských norem ÖNORM 7510 (5)

Zjednodušený výpočet komínové ztráty (pro kapalná a plynná paliva) se používá pro stanovení účinnosti u přenosných analyzátorů s elektrochemickými převodníky a vychází z rakouských norem (7). Výpočet je možné uskutečnit dle obsahu kyslíku ve spalínách pomocí vztahu (3):

$$Z_k = \left(\frac{A}{21 - \varphi_{O_2}} + B \right) (t_{sp} - t_{vz}) \quad (3),$$

kde je φ_{O_2} je obsah O_2 ve spalínách v % obj., t_{sp} je teplota spalin na výstupu z kotle ve °C, t_{vz} je teplota vzduchu na vstupu do kotle ve °C, A a B jsou konstanty zohledňující druh a případně vlhkost spalovaného paliva (tab. III.).

Ztráta tlaku páry mezi kotlem a turbínou (7)

$$p_2 = p_1 (1 - a) \quad (4),$$

kde p_1 je tlak páry za parním kotlem, p_2 je tlak na vstupu do turbíny, koeficient a nabývá hodnot 0,10–0,15, tomu odpovídá snížení teploty páry o 15–20 °C.

Množství páry potřebné na výrobu elektrické energie (6)

$$\dot{m}_p = N \cdot D_s \quad (5),$$

kde $\dot{m}_p$ je tok páry ($t \cdot h^{-1}$), N je výkon turbogenerátoru (kW) a D_s je měrná spotřeba páry ($t \cdot kWh^{-1}$).

Tepelný obsah páry

$$i = c_p t + r \quad (6),$$

kde i je měrná entalpie páry ($kJ \cdot kg^{-1}$), $c_p t$ je kapalinné teplo ($kJ \cdot kg^{-1}$) a druhý člen r je výparné teplo vody ($kJ \cdot kg^{-1}$).

Obr. 4. Tepelně energetická centrála: turbogenerátor (3)



Tab. I. Hodnoty konstanty K_1 dle ČSN 07 0305 (4)

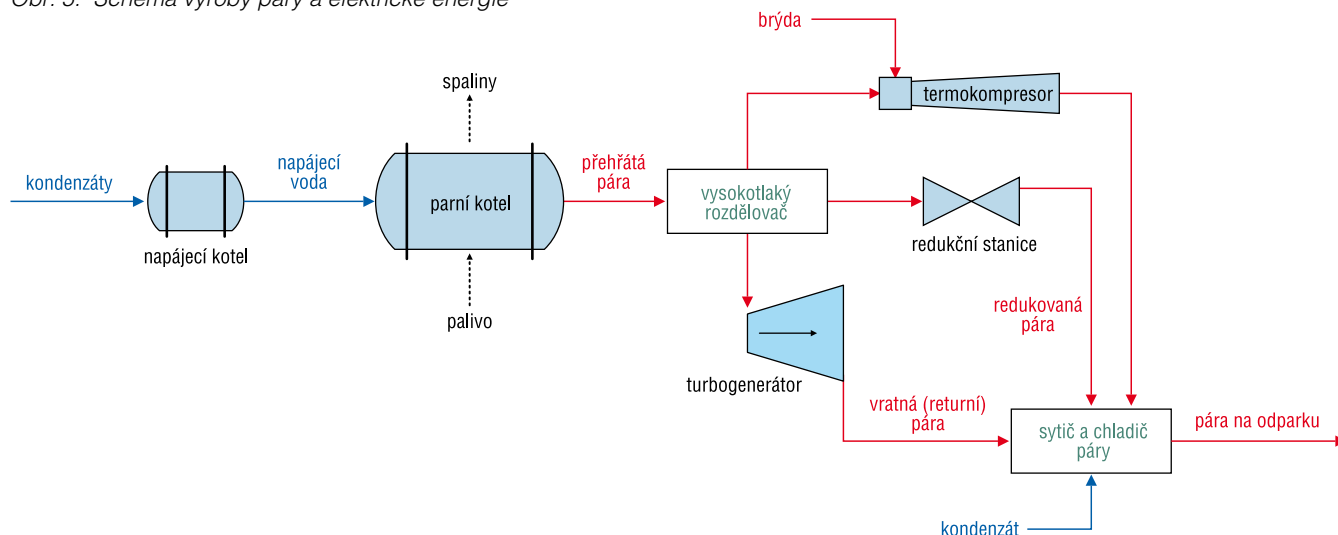
Palivo	Konstanta K_1
Koks	0,80
Černé uhlí	1,0 K_2
Hnědé uhlí	1,1 K_2
Kamenouhelný dehtový olej	0,66
Topný olej	0,60
Zemní plyn	0,48

Množství chladicí vody pro úpravu parametrů páry (7)

$$\dot{m}_w = \dot{m}_p \frac{i_1 - i_2}{i_2 - i_w} \quad (7),$$

kde $\dot{m}_w$ je množství chladicí vody ($t \cdot h^{-1}$), $\dot{m}_p$ je množství páry ($t \cdot h^{-1}$), i_1 je měrná entalpie páry na vstupu ($kJ \cdot kg^{-1}$), i_2 je měrná entalpie páry na výstupu ($kJ \cdot kg^{-1}$) a i_w je měrná entalpie chladicí vody ($kJ \cdot kg^{-1}$).

Obr. 5. Schéma výroby páry a elektrické energie



Tab. II. Hodnoty konstanty K_2 dle ČSN 07 0305 (4)

Vlhkost paliva w_f (%)	Obsah CO_2 v suchých spalínách w_{CO_2} (%)					
	6	8	10	12	14	18
0	0,652	0,658	0,666	0,68	0,68	0,69
10	0,661	0,668	0,678	0,69	0,70	0,71
20	0,671	0,681	0,693	0,71	0,72	0,73
30	0,689	0,702	0,717	0,74	0,75	0,77
40	0,724	0,742	0,762	0,78	0,81	0,83
50	0,774	0,799	0,827	0,86	0,89	0,92
60	0,847	0,885	0,925	0,97	1,00	1,05

Závady při provozu kotelny

Ekonomika výroby páry závisí především na typu a stavu instalovaných kotlů a používaném palivu. Zvyšování kapacity cukrovarů se stávajícími kotelny vede obvykle k přetěžování kotlů. V případě kotlů na uhlí nestačí totiž palivo dohořet, zvyšují se ztráty ve škváře a snižuje se účinnost kotelny. Často je tento stav provázen i ekologickými problémy – zvýšenou kouřivostí. V případě špatně provozovaných kotlů bývají teploty spalin 250–300 °C. To představuje značnou komínovou ztrátu.

Častým nedostatkem je nesprávný přebytek vzduchu ve spalovacím procesu. Pokud je přebytek vzduchu < 1,2–1,4 (pro roštové kotle podle typu), dochází k nedokonalému spalování. Se škvárou odchází část nespáleného paliva a ve spalínách oxid uhelnatý. Pokud je přebytek vzduchu vyšší než cca 1,5–1,7,

Tab. III. Hodnoty konstant A a B ve vztahu (2)

Typ paliva	Palivo	Vlhkost w_f (%)	A	B
Kapalná a plynná paliva (5)	Extra lehký topný olej		0,6642	0,0086
	Lehký topný olej		0,6655	0,0082
	Biogenní olej		0,6553	0,0080
	Zemní plyn		0,6440	0,0111
	Propan/butan (50/50 %)		0,6335	0,0092
Pevná paliva (6)	Biomasa	0	0,6572	0,0093
		10	0,6682	0,0107
		20	0,6824	0,0125
		30	0,7017	0,0149
		40	0,7290	0,0183
		50	0,7709	0,0235
	Hnědé uhlí	0	0,6717	0,0073
		10	0,6809	0,0084
		20	0,6936	0,0097
		30	0,7070	0,0115
		40	0,7281	0,0140
	Černé uhlí a koks	0	0,6901	0,0054
		5	0,6932	0,0057
		10	0,6967	0,0061
		15	0,7006	0,0065
		20	0,7050	0,0069
Pevná paliva (průměrná vlhkost)	Štípané dřevo	15	0,6753	0,0116
	Dřevní pelety	8	0,6660	0,0104
	Suchá štěpka	25	0,6921	0,0137
	Vlhká štěpka	40	0,7290	0,0183
	Hnědé uhlí	20	0,6936	0,0097
	Černé uhlí a koks	5	0,6932	0,0057

je sice palivo dokonale spáleno, musíme však ohřívat zbytečně mnoho vzduchu, který odchází se spaliny a zvyšuje se tak komínová ztráta. I v případě kotlů topených olejem se vyskytují špatně seřízené hořáky a přívod vzduchu.

Použití kondenzátů v kotelně

Jako napájecí voda se používají kondenzáty z 1. a 2. tělesa odparky. Pokud nejsou porušené trubky, není-li instalován termokompresor, jsou kondenzáty z 1. tělesa čisté, beze stop cukru. Kondenzáty z 2. tělesa (z 1. brýdy) nesmí obsahovat přestříky šťávy. Proto se musí kvalita kondenzátů vrácených do kotleny kontrolovat na přítomnost stop sacharosy.

Sborníky kondenzátů v kotelně mohou být odvětrány do atmosféry. To má za následek ztrátu tepla v páře expandované z přehřátého kondenzátu. Kondenzát se opět v kotli musí ohřívat. Pokud není tlakový sborník, je výhodné toto teplo využít. Jednou z možností je na stávající expanzní potrubí instalovat trubkový výměník, který ohřívá šťávu nebo vodu na otop. Expanzní (odvětrávací) potrubí vede ze sborníku do zahříváče, zde předá teplo a teprve nezkondenzovaná část vodní páry a plyny odchází do atmosféry. Tlak ve sborníku se zvýší pouze o tlakové ztráty v zahříváči, které jsou zanedbatelné.

Druhou možností je instalace deskového výměníku kondenzát – šťáva, ve kterém se přehřátý kondenzát ochladí na cca 100 °C, takže ve sborníku již nedochází k žádné expanzi.

Literatura

1. JENSEN, A. S.; MORIN, B.: Energy and the environment in beet sugar production. *Sugar Ind./Zuckerind.*, 140, 2015, s. 697–702.
2. KADLEC, P. ET AL.: *Přednášky z Technologie cukru pro bakalářské a magisterské studium*. Praha: FPBT VŠCHT, 2022.
3. KADLEC, P.: *Technologie cukru*. s. 429–448. In KADLEC P.; MELZICH K.; VOLDŘICH M. (ED). ET AL.: *Technologie potravin – Přehled tradičních potravinářských výrob.* Ostrava: KEY Publishing, 2012, 569 s.
4. ČSN 07 0305 Hodnocení kotlových ztrát. 07/1984.
5. ÖNORMM 7510-2:2012 Überprüfung von Heizungsanlagen Teil 2.
6. ÖNORMM 7510-2:2012 Überprüfung von Heizungsanlagen Teil 4.
7. BRETSCHNEIDER, R.: *Technologie cukru: surovarna a rafinerie*. Praha: SNTL, 1980, 424 s.