

## KONDENZACE SPALIN ZDROJE SPALUJÍCÍ PEVNÁ PALIVA

Ondřej Hlaváček, Alice Vagenknechtová

Ústav plynných a pevných paliv a ochrany ovzduší  
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6  
Ondrej.Hlavacek@vscht.cz

V České republice se stále častěji dostává do povědomí biomasa, a to i v kontextu paliva. V rámci naplnění evropských klimatických plánů je spalování biomasy některými programy zvýhodňováno (zelené bonusy, garantovaná výkupní cena) a jinými penalizováno (EU ETS – European Union Emission Trading System). Biomasa sama o sobě je však velmi obsáhlý termín a jednotlivé typy biomasy se kvalitativně od sebe poměrně výrazně liší. Jedním z nejvíce diskutovaných druhů biomasy je dřevní štěpka, a to především svou dostupnou kvantitou. Vlhkost dřevní štěpky ovšem značně osciluje a v některých případech dosahuje hodnoty až 50 % hm. Kondenzační režim spalin umožňuje odstranění vlhkosti po spalovacím procesu, využití části latentního tepla a zvýšení účinnosti procesu. Článek se zabývá návrhem kondenzační technologie na reálné podmínky kotlů spalující pevná paliva na bázi biomasy průmyslového partnera.

*Klíčová slova:* spaliny, kondenzace, teplárna, teplo

Došlo 21. 01. 2023, přijato 14. 03. 2023

### 1. Úvod

V kontextu s klimatickými plány EU a útlumem využívání fosilních paliv je stále více energeticky využívána i biomasa. ČR má velkou část svého energetického mixu (43,89 %) [1] založenou právě na spalování uhlí. Transformace velkých energetických zdrojů je poměrně náročná, přesto stále více provozovatelů vidí náhradu uhlí v dřevní štěpce [2]. Dřevní štěpka je však materiál s relativně vysokým obsahem vody, který navíc značně kolísá podle původu, zpracování a přepravy, přičemž obsah vody paliva zásadním způsobem snižuje jeho výhřevnost, a tedy i množství využitelného tepla.

Zatímco pre-combustion metoda snížení vlhkosti – sušení – je poměrně známá, pro kvantitu dodávek paliva velkých energetických zdrojů není tato metoda příliš využívána. Pro aplikaci tohoto přístupu navíc teplárny často postrádají dostatečný zdroj jinak nevyužitelného tepla o dostatečných parametrech pro sušení. Konkrétním příkladem aplikace sušárny je teplárna v Plané nad Lužnicí. Sušárna je otápěna primárně vratnou vodou z horkovodu (60 °C) a na 95 °C dohřívána ostrou parou. Sušárna však neplní primárně funkci úspory paliva, nýbrž je teplárnou využívána pro rychlejší regulaci kotlů v závislosti na poskytování podpůrných služeb elektrické distribuční soustavy, což při souběhu nutnosti a nadměrně mokrého materiálu není možné. Sušárna snižuje obsah veškeré vody o zhruba 10 %.

Jako efektivní způsob odstranění vody se jeví kondenzace spalin. Zatímco u zařízení spalujících zemní plyn je tento přístup běžný, u zdrojů využívajících pevná paliva nikoliv, a to zejména z důvodu čistoty spalin. Při kondenzaci spalin se od plynné fáze odděluje nejen voda, ale například i kyselá sírná či halogenovaná látka. Přesto využití latentního tepla může vést k významným úsporám, v některých případech až o 20 %.

Využití kondenzace spalin je často využíváno ve Finsku. Teplárna Haapaniemi disponuje systémem kon-

denzace spalin, který umožňuje teplárně rekuperovat teplo až v množství 46 MWh [3]. Obdobný systém je umístěn i na teplárně v litevském Vilnius [4]. Na elektrárně Kokkola ve Finsku byl systém instalován na stávajícímu CFB kotli o příkonu 109 MW. Systém kondenzace spalin a rekuperace tepla zvyšuje produkci o 15 MW a snižuje roční spotřebu paliva o množství, které se rovná přibližně 400 kamionům s palivem [5]. Mezi další provozovny s touto technologií jsou např. v rakouském Bruck an der Mur (kotel 58 MW, kondenzační jednotka 11 MW) [6], finském Naantali (kotel 390 MW, kondenzační jednotka 60 MW) [7], finském Joensuu (kondenzační jednotka 60 MW) [8], dánském Kalundborg (kotel 130 MW, kondenzační jednotka 32 MW) [9], či v Helsinkách (kotel 220 MW, kondenzační jednotka 69 MW) [10].

### 2. Návrhová část

Tento článek se věnuje konkrétnímu případu, a sice teplárně v Mladé Boleslavi. Teplárna je v procesu přestavby ze spalování hnědého uhlí na směs biomasy, konkrétně dřevní štěpky a rostlinných pelet, do budoucna se uvažuje i o využití některých paliv z klasifikace TAP [11]. Dřevní štěpka je dodávána v širokém kvalitativním rozsahu, přičemž dlouhodobě se obsah veškeré vody pohybuje mezi 20 až 55 % hm. Tab. 1 uvádí hodnoty výhřevnosti, spalného tepla a obsahu veškeré vody v původním stavu paliva, vyplývající z provozních analýz za období roku 2022.

Aktuálně teplárna disponuje dvěma fluidními kotli s cirkulující vrstvou (CFB), přičemž každý produkuje 140 t·h<sup>-1</sup> páry (535 °C, 12,5 MPa). Tyto kotle nesou označení K80 a K90. Po retorfitu na biomasu dojde ke snížení produkce páry obou kotlů na 100 t·h<sup>-1</sup>, přičemž pro chybějících 80 t·h<sup>-1</sup> páry bude vybudován nový fluidní kotel se stacionární vrstvou (BFB) nesoucí označení K20.

**Tab. 1** Vlastnosti spalovaných paliv v původním stavu  
**Tab. 1** Parameters of fuels of original state of the fuel

	Výhřevnost (MJ·kg <sup>-1</sup> )	Spalné teplo (MJ·kg <sup>-1</sup> )	Obsah veškeré vody (% hm.)
Dřevní štěpka průměr	11,31	20,69	35,38
Dřevní štěpka dobrá	15,12	20,42	19,27
Dřevní štěpka špatná	6,99	18,85	53,53
Rostlinné peletky	15,66	19,06	11,53
Hnědé uhlí	18,86	20,35	28,31

Při hledání řešení snížení vlhkosti paliva byly nalezeny tři zdroje:

- chladicí okruh,
- vratná topná voda,
- teplo spalin (komínová ztráta).

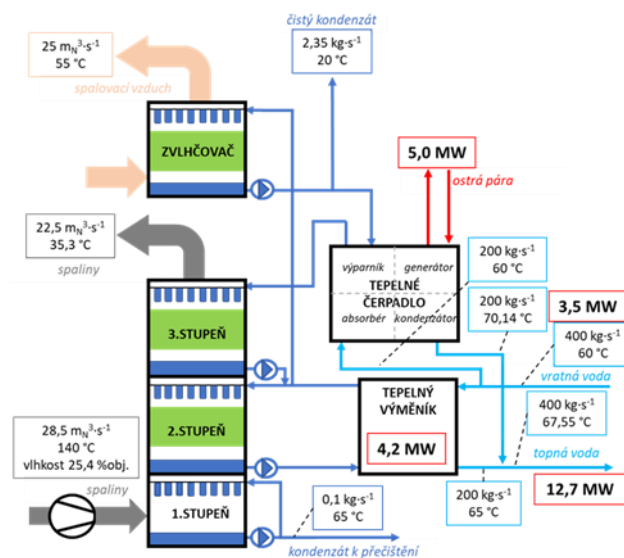
Výpočet se zabývá pouze budoucím stavem, tedy spalováním směsi biomasy (dřevní štěpky a peletizované rostlinné fytohmoty), nikoliv spalováním uhlí. Palivo pro kotel K20 je pouze dřevní štěpka. v případě kotlů K80 a K90 se jedná dřevní štěpku do 70 % příkonu, zbylých 30 % příkonu je zastoupeno peletizovanou rostlinnou fytohmotou. Výpočet byl proveden pro dvě kvality dřevní štěpky, kdy je uvažováno s obsahem veškeré vody 35 a 50 % hm.

Teplota vody v chladicím okruhu se pohybuje v rozmezí 25-35 °C a její teplo v sobě neobsahuje pro aplikaci sušení dostatečný potenciál. Navíc v případě zmíněného podniku tato aplikace vzhledem k dispozici rozvodů není možná. Vratná voda z horkovodního okruhu dosahuje průměrných hodnot okolo 60 °C, rozvody rovněž nejsou pro začlenění sušárny vhodné, navíc se nejedná o úsporu energie, nýbrž pouze o využití tepla s nízkým potenciálem. Chybějící energii by v tomto případě bylo nutné dotovat na blokovém ohříváku. Potenciál spalin se v tomto případě jeví jako největší (140-160 °C), ovšem využití pro sušárnu není možné z dispozičních důvodů (palivové hospodářství je cca 150 m vzdálené od koteln). I z tohoto důvodu se jeví post-combustion způsob získání tepla spalin jako ideální, a to zejména z dispozičních důvodů.

Na základě konzultací vedených s potenciálním zhotovitelem technologie byla vybrána následující varianta uspořádání skládající se ve třístupňového scrubberu. V první kroku jsou spalin vyprány vodní vypirkou. Voda z tohoto kroku není kvůli svému znečištění tepelně využívána a cirkulující kondenzát je z okruhu kontinuálně odebírán a dle možností a potřeb provozu přečišťován.

Následně jsou spalin vedeny do druhého stupně scrubberu. Skrápěná voda je odváděna do tepelného vý-

měníku, kde dochází k předání tepla vratné vodě horkovodu. Schéma uspořádání technologie pro kotel K20 je uvedeno na obr. 1. Alternativně je možné druhý stupeň scrubberu nahradit přímo válcovým výměníkem. Toto řešení je ovšem materiálově i prostorově náročnější a dosahuje menší účinnosti přestupu tepla.

**Obr. 1** Schéma technologie pro kotel K20  
**Fig. 1** Technology scheme of boiler K20

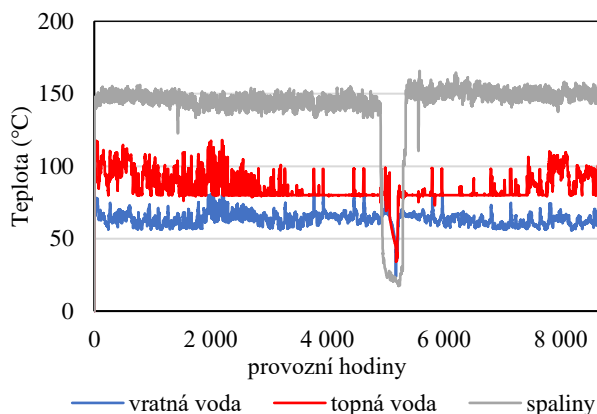
Pro zvýšení účinnosti provozu je zařazen třetí stupeň scrubberu. Skrápěná voda třetího stupně je vedena do zvlhčovače spalovacího vzduchu, který je tímto předehříván, a zároveň tím vychlazujeme vypírku třetího stupně. Zvýšený obsah vodní páry ve spalovací komoře zvyšuje tepelnou vodivost fluidní vrstvy a účinnost kondenzační jednotky.

### 3. Výsledky a diskuse

Jedním z prvních kroků bylo popsání provozních podmínek a srovnání s budoucím uspořádáním provozu.

Každý ze třech výše jmenovaných kotlů disponuje vlastním spalinovodem, které se sbíhají až v komíně. I vzhledem k odlišnému umístění kotlen je pro návrh nutné uvažovat s výstavbou technologie pro každý kotel zvlášť. Dosažené teploty spalin během roku jsou patrné na obr. 2 a tab. 2. Nejzásadnější výchylka náleží pravidelné odstávce. Byl zaveden předpoklad, že teplota spalin po provedení retrofitu bude totožná se současným stavem.

Stejným způsobem byly popsány odběrové diagramy produkce tepla. Tyto parametry rovněž nebudou budoucím uspořádání nijak ovlivněny, projekt se týká retrofitu koteln se zachování parní produkce, přičemž technologie strojovny včetně topných ohříváků zůstává nezměněna. Horkovod je dimenzován na hodnoty topné a vratné vody 80, respektive 60 °C. V průběhu rozvoje průmyslové zóny došlo ke zvýšené spotřebě tepla a teploty topné vody jsou často vyšší než hodnoty projektované, viz obr. 2. Tlak v horkovodu je stabilně udržován v rozmezí 0,78 – 0,8 MPa.



Obr. 2 Teploty vody v horkovodu a spalin

Fig. 2 Temperatures of hot water piping and flue gas

Tab. 2 Parametry spalin horkovodu

Tab. 2 Flue gas and hot water piping parameters

	K80	K90	
$t_{\text{průměr}}$	147,97	146,22	°C
$t_{\text{max}}$	165,71	164,27	°C
$Q_{\text{měřený}}$	219 795	219 795	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
$Q_{\text{vlhké}}^*$	139 895	140 600	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
$Q_{\text{suché}}^*$	124 265	125 625	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
$p$	0,78 - 0,8		MPa
	topná voda	vratná voda	
$t_{\text{průměr}}$	86,47	63,9	°C
$t_{\text{max}}$	117,92	81,99	°C
$Q$	400		$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\Delta t_{\text{průměr}}$	23,03		°C
$\Delta t_{\text{max}}$	47,2		°C

\* 101 325 Pa, 0 °C

Při výpočtu a průběžných konzultacích s potenciálními výrobci vyplynulo ideální uspořádání popsané v návrhové části tohoto článku. Na spalinovod bude instalován třístupňový scrubber, přičemž kondenzát z prvního kroku bude likvidován podnikovou technologií pro čištění odpadních vod z lakoven. V druhém kroku bude sprchovaný kondenzát veden do externího tepelného výměníku, který bude přímo ohřívat horkovod. Ochlazený kondenzát z výměníku bude z větší části vrácen pro sprchování druhé stupně. Z důvodu vysoké teploty topné vody je nutné dohřívát část topné vody proudem z tepelného čerpadla. Tepelné čerpadlo je otápěno ostrou parou. Třetí stupeň scrubberu je sprchován ochlazenou vodou z výparníku tepelného čerpadla a kondenzát je přidáván do sprchujícího proudu druhé stupně. Systém je vybaven zvlhčovačem spalovacího vzduchu. Spalovací vzduch je zvlhčován (formou jemné vypírky), přičemž kondenzát ze zvlhčovače je částečně odebrán a odváděn pryč ze systému a částečně je veden do výparníku tepelného čerpadla. Celý systém je znázorněn na obr. 1. Technologie má v tomto případě obdobné řazení jako je tomu např. v elektrárně Vuosaari ve Finsku [10]. Vypočtené výsledky shrnuje tab. 3.

ného čerpadla. Celý systém je znázorněn na obr. 1. Technologie má v tomto případě obdobné řazení jako je tomu např. v elektrárně Vuosaari ve Finsku [10]. Vypočtené výsledky shrnuje tab. 3.

Tab. 3 Výsledky navržené technologie

Tab. 3 Technology design parameters

	K20	K80/90	K20	K80/90
Obsah veškeré vody dřevní štěpky (%)		35		50
Produkce páry ( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	80	100	80	100
Rel. příkon dřevní štěpky* (%)	100	70	100	70
T. vratné vody (°C)		60		60
Výkon výměníku (MW)	0	0	4,2	6,2
Výkon tepelného čerpadla (MW)	3,7	5	3,5	5,3
Příkon tepelného čerpadla (MW)	5,4	7,2	5	7,5
Celkový vyvedený výkon (MW)	9,1	12,2	12,7	19
Celkový čistý výkon (MW)	3,7	5	7,7	11,5
Teplota spalin v komínu (°C)	27,2	28,6	35	35,9
Množství kondenzátu ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0,4	0,4	2,35	2,85
Teplota vratné vody (°C)		65		65
Výkon výměníku (MW)	0	0	1,77	2,8
Výkon tepelného čerpadla (MW)	3,7	5	3,55	5,3
Příkon tepelného čerpadla (MW)	5,4	7,2	5	7,6
Celkový vyvedený výkon (MW)	9,1	12,2	10,3	15,7
Celkový čistý výkon (MW)	3,7	5	5,3	8,1
Teplota spalin v komínu (°C)	27,2	28,6	40,7	41,3
Množství kondenzátu ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0,4	0,4	1,2	1,5
Vnitřní průměr scrubberu (m)	4,5	5,4	4,5	5,4
Spotřeba elektřiny ( $\text{kW}_e$ )	120	175	120	175

Ani jeden z modelových příkladů bohužel nedosahuje parametrů horkovodního systému. V porovnání s elektrárnou ve Vuosaari jsou patrné dva hlavní důvody.

Prvním z nich jsou teplotní parametry horkovodu. Zatímco české vytápění je dimenzováno na rozdíl topné a vratné vody 80, respektive 60 °C, u finských systémů je tento rozdíl 60, respektive 40 °C.

Druhým z nich je vlhkost paliva. Zatímco průměrné hodnoty obsahu veškeré vody v palivu teplárny v Mladé Boleslavi dosahují 35 %, u elektrárny ve Vuosaari je to 50 %. Při konzultacích s potenciálním dodavatelem systému jsme došli k závěru, že výstavba technologie kondenzace pro palivo s vlhkostí 35 % hm. není pro provozní účely rentabilní a voda by musela být do paliva při štěpkování dodatečně zapracována. Ovšem ani při dosažení obsahu veškeré vody v palivu na 50 % by technologie nebyla schopna dosáhnout požadované teploty topné vody.

Jediné možné řešení tak spočívá v aplikaci pouze dvoustupeňového scrubberu pro přehřev topné vody před finálním dohřátím na blokových ohřívácích.

#### 4. Závěr

S rostoucím tlakem na využívání obnovitelných zdrojů energie roste počet spalovacích zdrojů využívající biomasu, kde je velký problém s obsahem vody v palivu. Technologie kondenzace spalin představuje řešení, jak využít latentní teplo paliva. V článku bylo popsáno možné uspořádání technologie kondenzace spalin zahrnující třístupňovou vodní vypírku, zvlhčovač spalovacího vzduchu a tepelné čerpadlo.

Návrhovým výpočtem bylo dokázáno, že uspořádání ani ve své maximalistické podobě nedokáže samostatně produkovat teplo využitelné v systému centrálního vytápění. Důvodem jsou vysoké teploty topné vody (min. 80 °C), což dokazuje i skutečnost, že obdobný systém je již provozován např. ve Finsku, kde je ovšem teplota topné vody na úrovni 60 °C. Při návrhu technologie se rovněž musí počítat se zvýšenými nároky na materiálové provedení technologie z důvodu kondenzace kyselotvorných látek. Rovněž je nutné zmínit, že systém vyžaduje technologii pro čištění kondenzátu a obvykle i instalaci dodatečného spalinového ventilátoru.

Řešením může být snížení teploty topné vody na úroveň 60 °C po vzoru jiných států, což by vedlo ke snížení spotřeby paliv. Bohužel toto řešení sebou přinese investice spojené s předimenzováním až celkovou výměnou některých topných systémů, které byly projektovány na původní hodnoty a nové parametry mohou být pro jejich funkci nedostatečné.

Možným řešením je teplo získané kondenzací spalin využít k přehřátí topné vody a následně dohřát na požadované parametry na blokovém ohříváku, což povede k úspoře topné páry ohříváku.

#### Poděkování

Článek vznikl ve spolupráci se společností ŠKO-ENERGO, s.r.o. v Mladé Boleslavi v rámci projektu Specifického vysokoškolského výzkumu, projekt č. A1\_FTOP\_2023\_003 a A2\_FTOP\_2023\_001.

#### Literatura

1. OTE,a.s. Národní energetický mix, <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>, staženo 21.1.2023.
2. Hanzlík V., Javůrek V., Smeets B, Svoboda D.: Klimaticky neutrální Česko, McKinsey & Company, Praha 2020.
3. Valmet to supply a flue gas scrubber to Kuopion Energia's Haapaniemi 2 power plant, <https://www.valmet.com/media/news/press-releases/2014/valmet-to-supply-a-flue-gas-scrubber-to-kuopion-energias-haapaniemi-2-power-plant/>, staženo 19. 1. 2023.

4. Valmet to complete biomass boiler, flue gas cleaning and flue gas condensing system works at Vilnius Combined Heat and Power Plant in Lithuania, <https://www.valmet.com/media/news/press-releases/2022/valmet-to-complete-biomass-boiler-flue-gas-cleaning-and-flue-gas-condensing-system-works-at-vilnius-combined-heat-and-power-plant-in-lithuania/>, staženo 19. 1. 2023.
5. Valmet to deliver a flue gas condensation system to Kokkola Energy's power plant in Finland, <https://www.valmet.com/media/news/press-releases/2019/valmet-to-deliver-a-flue-gas-condensation-system-to-kokkola-energys-power-plant-in-finland/>, staženo 19. 1. 2023.
6. Valmet to supply a complete steam boiler plant to Norske Skog in Austria, <https://www.valmet.com/media/news/press-releases/2020/valmet-to-supply-a-complete-steam-boiler-plant-to-norske-skog-in-austria/>, staženo 19.1.2023
7. Flue Gas Condenser System, <https://www.mercell.com/da-dk/udbud/103973805/flue-gas-condenser-system-udbud.aspx>, staženo 13.3.2023.
8. Energy efficiency with condenser technology, <https://www.fortum.com/media/2016/02/energy-efficiency-condenser-technology>, staženo 19.1.2023
9. Ørsted's Asnæs 6 CHP plant completed, <https://www.modernpowersystems.com/features/featuresteds-asns-6-chp-plant-completed-7750575/>, staženo 19.1.2023.
10. Helen Ltd.: Vuosaari bioenergy heating plant, <https://www.helen.fi/en/company/energy/development-projects/biolampolaitokset/vuosaari-bioenergy-heating-plant>, staženo 10. 12. 2022.
11. Hlaváček O.: Spoluspalování čistírenského kalu na teplotěnské technologii, Paliva 14, 74-78 (2022), doi:10.35933/paliva.2022.02.02.

#### Summary

##### *Flue gas condensation of solid fuel fired heating plant*

*Ondřej Hlaváček, Alice Vagenknechtová*

In Czech Republic is increasing trend in utilization of biomass as a fuel in heating and power plants. This is preferred solution by EU Climate plans, and it is connected with some economic benefits (e.g. green bonuses, guaranteed purchase price), on the other hand the combustion of fossil fuels is penalized (EU ETS – Emission Trading System). There are many types of biomass with different parameters but one of the most discussed are wooden residues because of its quantity.

There are big differences between quality parameters, especially in moisture content, which is decreasing the LHV. There are some technologies which can de-

crease moisture. Dryer technologies could be simple solution, but final decreasing of moisture is quite low. More effective is application of flue gas condensation. This technology is well known for gas-fired boilers but nowadays is still more often build by new solid fuels-fired plants.

This deals with design of condensation technology for existing heating plant in Mladá Boleslav. The fuel mixture is based on wood residues (70 %) and pelletized plant biomass (30 %). The calculation was done for three boilers for solid fuels – two same CFBs (steam production  $100 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ ) and one BFB (steam production  $80 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Moisture content was calculated for two cases of wooden residues with moisture content 35 and 50 %. System of condensation include three step water scrubber, heat exchanger, heat pump and humidifier of combustion air.

The final designed output of unit for BFB is 12.7 MW (19 MW for each CFBs), but from these the output of heat pump is 5 MW (7.5 MW). The source of heat for heating pumps is steam, which can be used in current

heater, so the final net output from condensation is 7.7 MW (11.5 MW). These parameters are only for 50 % of moisture content in wooden residues.

The application of these system is not cost-effective for moisture content of fuel around 35 %. It is possible to build this technology for 50 % of fuel moisture content, but technology will not raise the temperature parameters of hot water. There are two differences between Mladá Boleslav heating plant and Finnish Vuosaari power plant in Helsinki, where the similar unit is already built. First of them is moisture content of fuel more than 50 %. Second one is temperature of hot water system  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , however in Mladá Boleslav is at least  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , sometimes it could be more than  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ . The decreasing of this temperature is problem because the most of heating systems were designed by current standards with temperature  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

The only possible solution is to build two steps scrubber and the waste heat utilize as preheater of hot water.