

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

**CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

**Potenciál pro zlepšení účinnosti elektrárenských kotlů
v kontextu s vývojem uhelných elektráren**

**Potential for improvement of power plant boilers efficiency
in relation to progress of coal-fired power plants**

Summary

Development of power facilities is characterized by the effort to reach higher efficiency. Potential for improvement of the pulverized coal fired boilers efficiency is evaluated in dependence on present conditions and expected development of coal fired power plants. However, generalization of results obtained in course of design of new coal-fired power plants is disputable due to difference in composition of coal from various locations. This fact is proved by the calculation of boiler efficiency and auxiliaries for two Bohemian lignite types differing in water and ash content.

In addition, the influence of steam parameters and feed water temperature increase on steam boiler efficiency was analyzed. Degradation of the boiler efficiency in consequence with these measures advancing power cycle efficiency was proved for classical boiler concept. Integration of flue gas feed water preheating to boiler arrangement instead of bleeding one and flue gas heat recovery to combustion air can help to overcome this problem. Feasible design and energy contribution of this measure was evaluated for prepared new power plant in Pocerady.

Souhrn

Vývoj energetických zařízení je charakteristický snahou o neustálé zvyšování jejich účinnosti. V kontextu se současnými možnostmi a očekávaným vývojem účinnosti uhelných elektráren je zhodnocen potenciál pro zlepšení účinnosti práškových kotlů. Zobecnování výsledků vývoje účinnosti nových uhelných energetických bloků je však problematické s ohledem na velmi odlišné vlastnosti uhlí z různých lokalit. Tato skutečnost je dokumentována na příkladu výpočtu účinnosti kotle a jeho vlastní elektrické spotřeby pro dva kvalitativně odlišné druhy hnědého uhlí uvažované pro nový blok elektrárny Počerady.

Dále je analyzován vliv zvyšování parametrů páry a teploty napájecí vody na dosažitelnou účinnost elektrárenského kotle. Je prokázáno, že tato opatření, která jednoznačně zvyšují účinnost tepelného oběhu parní elektrárny, zhoršují podmínky pro dochlazení spalin v kotli a při použití klasické koncepce kotle mohou dokonce limitovat jeho dosažitelnou účinnost. Řešením je zařazení regeneračního ohřevu napájecí vody spalinami do tepelného schématu bloku, které pak připouští větší dochlazení spalin, a tím potenciální zvýšení účinnosti kotle resp. celé elektrárny. Možné technické provedení a energetický přínos tohoto opatření je dokumentován na návrhových variantách nových bloků, jejichž výstavbu plánuje společnost ČEZ a.s. v lokalitě Počerady.

Klíčová slova

účinnost elektrárny, účinnost kotle, vlastní spotřeba elektrárny, využití odpadního tepla spalin

Key words

power plant efficiency, boiler efficiency, auxiliaries, flue gas heat recovery

České vysoké učení technické v Praze

Název : Potenciál pro zlepšení účinnosti elektrárenských kotlů v kontextu s vývojem uhelných elektráren

Autor : Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

Počet stran : 21

Náklad :

© Tomáš Dlouhý, 2005

ISBN

Obsah :

1	ÚVOD	6
2	ÚČINNOST BLOKU UHELNÉ PARNÍ ELEKTRÁRNY	6
3	TECHNOLOGIE SOUČASNÝCH UHELNÝCH ELEKTRÁREN	8
4	ÚČINNOST ELEKTRÁRENSKÝCH KOTLŮ	9
	4.1 VLIV OBSAHU VODY A POPELOVIN NA ÚČINNOST KOTLE	10
	4.2 VLIV SLOŽENÍ UHLÍ NA VLASTNÍ ELEKTRICKOU SPOTŘEBU KOTLE.....	12
	4.3 VLIV PARAMETRŮ PÁRY A TEPLoty NAPÁJECÍ VODY NA ÚČINNOST KOTLE .	14
5	ZÁVĚRY	19

1 Úvod

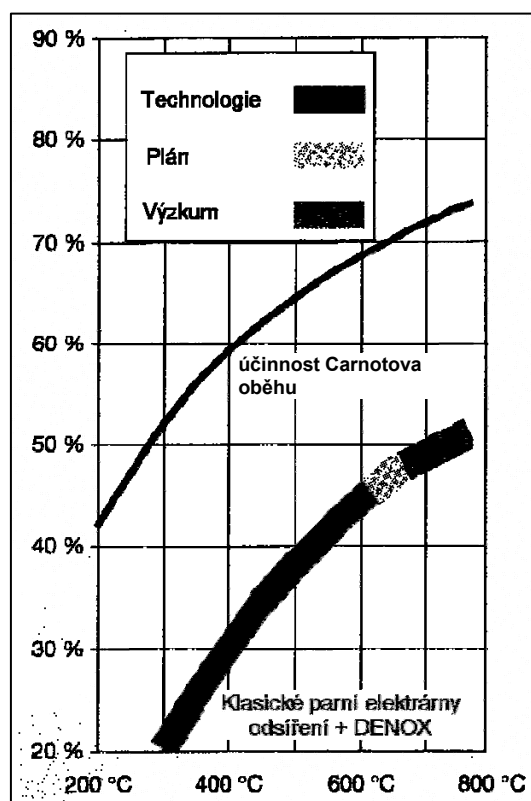
Energetika prochází obdobím velkých změn. Vybudování volného trhu s energií ve většině evropských států klade zcela nové nároky na technickou úroveň a provoz energetických zdrojů, přičemž ekonomická kritéria se stávají prvořadými. Kromě toho se zvyšují nároky na ochranu životního prostředí. Zatímco většina problémů se znečišťováním životního prostředí škodlivými látkami produkovanými energetickými výrobkami byla alespoň zčásti vyřešena, do popředí se dostává hrozba skleníkového efektu, k čemuž hlavní měrou přispívá CO_2 a další skleníkové plyny produkované energetickými zařízeními. Nejhůře v tomto smyslu vycházejí technologie na bázi spalování uhlí, především klasické parní uhelné elektrárny. Proto snad více než kdy před tím vystupuje do popředí potřeba vyvíjet zařízení s vyšší účinností, které přispějí k úspoře primárních energetických zdrojů, a tím i k omezení negativních ekologických vlivů. Ve vztahu k českým podmínkám nabývá tento problém na aktuálnosti s ohledem na připravovanou komplexní obnovu starých uhelných elektrárenských bloků a zamýšlenou výstavbu nových.

2 Účinnost bloku uhelné parní elektrárny

Netto účinnost přeměny energie vázané v uhlí na elektřinu je v praxi omezena

- zvoleným technologickým procesem,
- kvalitou použitých energetických strojů a systémů,
- dostupnými materiály a
- parametry pracovních médií.

U parních elektráren, jejichž základem je aplikace Rankin-Clausiova (R-C) oběhu, ovlivňuje čistou účinnost bloku mnoho faktorů a k jejímu zvyšování mohou přispět zásahy v celém řetězci přeměn. Obvykle však největší prostor nabízejí zásahy do parametrů a uspořádání tepelného oběhu. V klasickém smyslu jde především o zvyšování střední teploty přívodu tepla do oběhu tj. zvyšování teploty páry, které je limitováno vlastnostmi materiálu posledního dílu přehříváku resp. mezipřehříváku. Potenciál pro zvyšování účinnosti touto cestou uvádí obr. 2-1 [1], který zachycuje očekávaný vývoj účinnosti



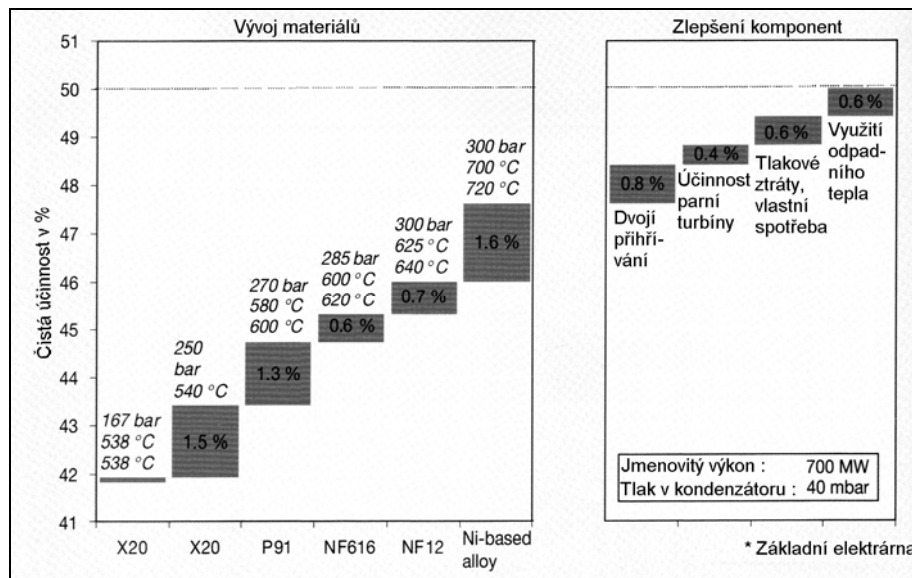
obr. 2-1 Očekávaný vývoj účinnosti parní elektrárny

klasických parních elektráren v závislosti na teplotě přehřáté páry. Teoreticky „dosažitelné“ maximum je určeno tzv. Carnotovou účinností.

Pro zvyšování účinnosti se u tradiční osvědčené technologie parního oběhu samozřejmě dají využít všechna karnotizační opatření:

- intenzifikace parametrů - admisních - zvyšování tlaku a teploty
- emisních - snižování protitlaku
- opakované přehřívání páry
- regenerační ohřev napájecí vody

Vedle těchto „klasických“ opatření vedoucích ke zlepšování účinnosti tepelného oběhu parní elektrárny je možné výslednou účinnost zvýšit zlepšováním účinnosti dílčích komponent, především parní kotle a turbíny, případně hledat nová opatření vedoucí k úsporám. Jedná se například o snižování vlastní spotřeby pomocných zařízení nebo aplikaci nových úsporných technologií např. pro sušení paliv.



obr. 2-2 Potenciál pro zvýšení účinnosti parní elektrárny – vývojem nových materiálů a zlepšováním komponent (zdroj : Siemens)

Největší potenciál pro zlepšení účinnosti vykazuje zvyšování parametrů admisní páry. Tato cesta je však podmíněna vývojem nových materiálů, které musí odolávat vysokým teplotám pod napětím, kromě toho je na ně kladena řada dalších požadavků. Ty se budou lišit podle určení pro :

- membránové stěny kotlů,
- koncové díly spalinových přehříváků a přehříváků páry,
- hlavní parní potrubí a
- lopatky a skříň parní turbíny.

Důležitá bude i odolnost vůči agresivním kondenzátům, které se mohou vylučovat ze spalin na koncových výhřevných plochách kotlů. Na obr. 2-2 je znázorněn vliv parametrů páry na dosažitelnou účinnost elektrárny a užití odpovídajících materiálů pro výstupní přehřívák a přehřívák. Z obrázku je vidět, že dnes již standardní ocel P91 lze použít pro parametry páry až do 270 bar, 580/600 °C. Další vývoj ocelí legovaných wolframem, jako např. NF12, umožní dosáhnout parametry 300 bar, 625/640 °C. Intenzivně se pracuje na vývoji nových materiálů, které by umožnily docílit podstatně vyšších parametrů páry (teplotu 720 °C a tlak více než 300 bar). K tomu je však zapotřebí opustit materiály na bázi oceli a přejít k výrobě, zpracování a testování superslitin na bázi niklu.

Dosažený stav i výhled účinnosti a parametrů páry uhelných elektráren je možno stručně charakterizovat následovně [2]:

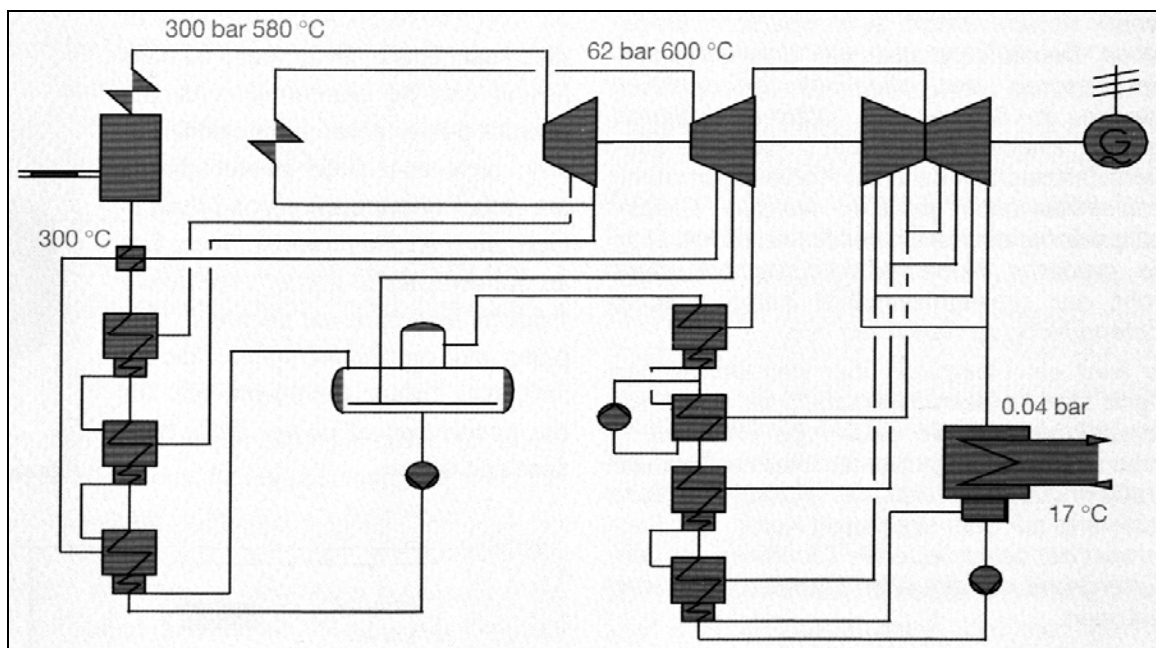
- a) **Standard** - starší podkritické i nadkritické bloky s průměrnou čistou účinností v Evropě $\eta_{\text{netto}}=0,35$.
- b) **Stávající špička** „Generace 600“ s tlakem kolem 30MPa, dvojnásobným mezipřehřátím a teplotami ostré páry i přehřátých par až do hodnot těsně nad 600°C. V závislosti na ostatních parametrech (palivo, teplota chladícího media, vyvedení tepla,...) se čistá účinnost pochopitelně mění, ale dosaženy byly hodnoty až $\eta_{\text{netto}}=0,47$. (*Mezní parametry této generace jsou patrně 33MPa/610°C*)
- c) **Aktuální vývoj** „Generace 700“ (AD700 Project -start 1998, očekávaná realizace 2014) s tlakem do 35-37,5 MPa, maximálními teplotami páry 700-720°C a čistou účinností až $\eta_{\text{netto}}=0,54$.
- d) **Výhled** směřovaný na období po roce 2020 „Generace 800“ s maximální teplotou páry v oblasti 800°C a čistou účinností vyšší než $\eta_{\text{netto}}=0,55$.

Z hlediska možné realizace v blízkém časovém horizontu je aktuální především bod b) uvedeného přehledu, a proto mu bude dále věnována hlavní pozornost.

3 Technologie současných uhelných elektráren

Uhelné elektrárny, které byly postaveny v poslední době, měly velmi podobnou koncepci založenou na ověřené a dlouhodobě vyvíjené technologii. Pracují na principu teoretického Rankin-Clausiova cyklu s jedním přehříváním páry a se šesti až osmi stupňovým regeneračním ohřevem napájecí vody. Schéma je vidět na obr. 3-1.

Parní kotel je nejčastěji koncipovaný jako průtočný s práškovým topením. Užití nízkoemisních hořáků s pásmovým přívodem vzduchu má za cíl potlačit tvorbu NO_x. Ohniště je většinou granulační, mokrá odvod strusky je postupně nahrazován suchým odpopelňováním. U větších výkonů převládá v poslední době věžové provedení kotle, kde do jalové části sestupného tahu může být umístěn katalytický DENOX, ve spodní části se nachází ohřívák vzduchu, případně další nízkoteplotní dochlazovací plochy.



obr. 3-1 Schéma parní uhelné elektrárny s jedním přehříváním

4 Účinnost elektrárenských kotlů

Účinnost kotle, která odpovídá míře využití chemicky vázané energie paliva, je dána pěti ztrátami :

- ztrátou fyzickým teplem spalin (komínovou) – je určena mírou vychlazení spalin a přebytkem vzduchu v nich,
- ztrátou hořlavinou v tuhých zbytcích – určuje ji podíl nespálených látek v tuhých zbytcích, který závisí především na způsobu spalování, obsahu popelovin v palivu a konstrukčním řešení spalovacího zařízení,
- ztrátou hořlavinou ve spalinách – určuje ji koncentrace CO ve spalinách, která závisí na kvalitě spalování, jedná se o nejmenší ztrátu,
- ztrátou fyzickým teplem tuhých zbytků – závisí na množství a teplotě škváry,
- ztrátou sdílením tepla do okolí – závisí na teplotě a velikosti povrchu kotle.

Přestože velikost těchto ztrát můžeme ovlivnit konstrukcí kotle a jeho spalovacího zařízení, jejich hodnota je do značné míry závislá na vlastnostech spalovaného paliva, především na obsahu vody a popelovin. Množství vody v palivu ovlivňuje objem spalin a tím i jejich citelné teplo, tedy velikost ztráty komínové. Obsah popela určuje ztrátu fyzickým teplem v tuhých zbytcích (TZ) a zhoršuje podmínky pro vyhoření paliva, takže ovlivňuje ztrátu hořlavinou v TZ.

Rozdíly ve vlastnostech uhlí jsou dány nejen jeho druhem, tedy kvalitativními rozdíly mezi černým a hnědým uhlím resp. lignitem, ale je nutné je hledat i mezi palivy stejného druhu. Rozhodující roli při tom hraje obsah vody a popela, které ovlivňují nejen výslednou výhřevnost uhlí, ale též určují podmínky spalování a jeho kvalitu. Znamená to že, rozdíly ve vlastnostech uhlí

ovlivňují přímo dosažitelnou účinnost kotle, potažmo i celé elektrárny a její provozní náklady, nepřímo pak investiční náklady parního kotle a pomocných zařízení, a to vždy v neprospěch uhlí méně kvalitního.

Další pozornost bude zaměřena především na hnědé uhlí, jakožto náš nejvýznamnější domácí zdroj primární energie, který zaujímá na trhu paliv poněkud odlišné postavení než jiné druhy paliv. Je to dáno především velkým podílem balastu, který omezuje užití hnědého uhlí na blízké okolí lokality jeho těžby, neboť náklady na dopravu do vzdálenějších míst vycházejí příliš vysoké.

4.1 Vliv obsahu vody a popelovin na účinnost kotle

Vliv obsahu vody a popelovin na účinnost kotle byl posuzován pro potřeby společnosti ČEZ a.s. v souvislosti s přípravou realizace nových uhelných bloků v lokalitě elektrárny Počerady (EPOČ). Pro tyto bloky přichází v úvahu užití dvou druhů severočeského hnědého uhlí z dolu Vršany nebo ČSA s kvalitativně odlišnými znaky, které zachycuje tab. 4-1.

tab. 4-1 Kvalitativní znaky hnědého uhlí z dolu Vršany a ČSA

Palivo		Uhlí	
		Vršany	ČSA
Zadané hodnoty :			
Složení paliva :			
voda		0,2900	0,2900
popel v sušině		0,3600	0,1300
uhlík v hořlavíně		0,6700	0,7250
vodík v hořlavíně		0,0550	0,0620
dusík v hořlavíně		0,0090	0,0120
síra v hořlavíně		0,0203	0,0220
kyslík v hořlavíně		0,2457	0,1790
Výhřevnost paliva	kJ/kg	11500	17500
Spalné teplo paliva	kJ/kg	12763	19056

Vliv vlastností paliva, především rozdílného obsahu vody a popela, byl respektován výpočtem rozdílu ztráty hořlavinou v TZ, ztráty fyzickým teplem TZ a ztráty fyzickým teplem spalin (ztráty komínové) obou paliv pro dochlazení spalin v kotli na stejnou teplotu. Při tom musely být zvoleny některé parametry, které se mohou v jednotlivých konkrétních případech lišit. Jejich volba byla provedena způsobem popsáním v tab. 4-2. Pro tyto zvolené hodnoty byly dopočteny výše uvedené ztráty, jejichž velikost je uvedena v tab. 4-3. Z výsledků je vidět, že účinnost kotle by se při stejném vychlazení spalin lišila zhruba o 1,8 procentního bodu. Vliv na výslednou účinnost bloku by byl zhruba poloviční, což je s ohledem na v úvodu zmíněné potenciály různých zlepšení vliv velmi významný.

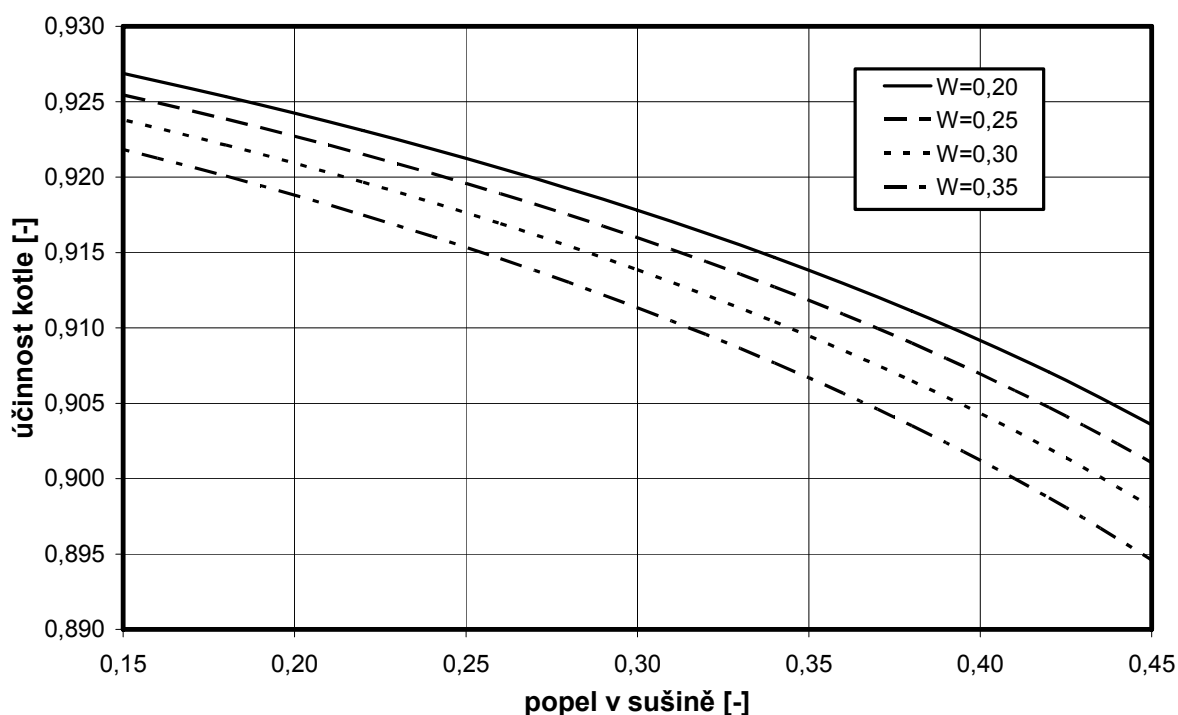
tab. 4-2 Kvalitativní znaky hnědého uhlí z dolu Vršany a ČSA

Zvolené hodnoty		Vršany	ČSA
teplota spalin za kotlem	°C	145	145
přebytek vzduchu za kotlem		1,3	1,3
teplota studeného vzduchu	°C	25	25
podíl spalitelných látek ve škváře		0,05	0,05
podíl spalitelných látek v úletu		0,02	0,02
ztráta chemickým nedopalem		0,0002	0,0002
ztráta sdílením tepla do okolí		0,0050	0,0050

tab. 4-3 Dopočtené ztráty a účinnosti kotle pro HU z dolu Vršany a ČSA

Dopočtené hodnoty		Vršany	ČSA
ztráta mechanickým nedopalem		0,0175	0,0042
ztráta fyzickým teplem popela		0,0020	0,0005
ztráta komínová		0,0698	0,0670
účinnost kotle		0,9055	0,9232

Popsaný postup byl použit pro propočty v širším spektru vlhkostí a popelnatostí hnědého uhlí, aby bylo možné provést určité zobecnění těchto poznatků. Získané výsledky byly vyneseny graficky jako závislost účinnosti kotle na obsahu vody a popela – viz obr. 4-1.



obr. 4-1 Závislost účinnosti kotle na obsahu vody a popela pro hnědé uhlí

tab. 4-4 Vlastní elektrická spotřeba kotle pro HU z dolu Vršany a ČSA

Vlastní spotřeba v závislosti na palivu		Vršany	ČSA
voda v palivu		0,29	0,29
Popel		0,36	0,13
Výhřevnost	kJ/kg	11500	17500
účinnost kotle		0,9055	0,9232
spotřeba uhlí na 1 MWh _t	t/MWh _t	0,3457	0,2228
Mletí uhlí			
měrná mlecí práce	kJ/kg	45	
souč. zvýšení		1,33	
měrný příkon mlýna	kWh/t	16,67	
mlecí práce	kWh/MWh _t	5,762	3,714
Příkon vzduchového ventilátoru			
přebytek nasávaného vzduchu		1,1	
účinnost vzduchového ventilátoru		0,7	
teplota nasávaného vzduchu	°C	20	
pracovní přetlak ventilátoru	kPa	3	
průtok vzduchu na 1 MWh _t	Nm ³ /MWh _t	1167,7	1161,8
příkon vzduchového ventilátoru	kWh/MWh _t	5,371	5,344
Příkon spalinového ventilátoru			
přebytek vzduchu za kotlem		1,3	
účinnost kouřového ventilátoru		0,7	
teplota nasávaného vzduchu	°C	145	
pracovní přetlak ventilátoru	kPa	3,5	
průtok spalin na 1 MWh _t	Nm ³ /MWh _t	1579,8	1518,4
příkon kouřového ventilátoru	kWh/MWh _t	12,09	11,62
Příkon elektrofiltrů			
na 1m ³ vlhkých spalin	kWh/m ³	0,0005	
příkon filtrů	kWh/MWh _t	1,21	1,16
Příkon dopravy paliva			
výška zdvihu	m	35	
práce na 1 kg paliva	kWh/t	0,09538	
koeficient zvýšení		3	
příkon palivového hospodářství	kWh/MWh _t	0,099	0,064
Součet			
	kWh/MWh _t	24,5	21,9

4.2 Vliv složení uhlí na vlastní elektrickou spotřebu kotle

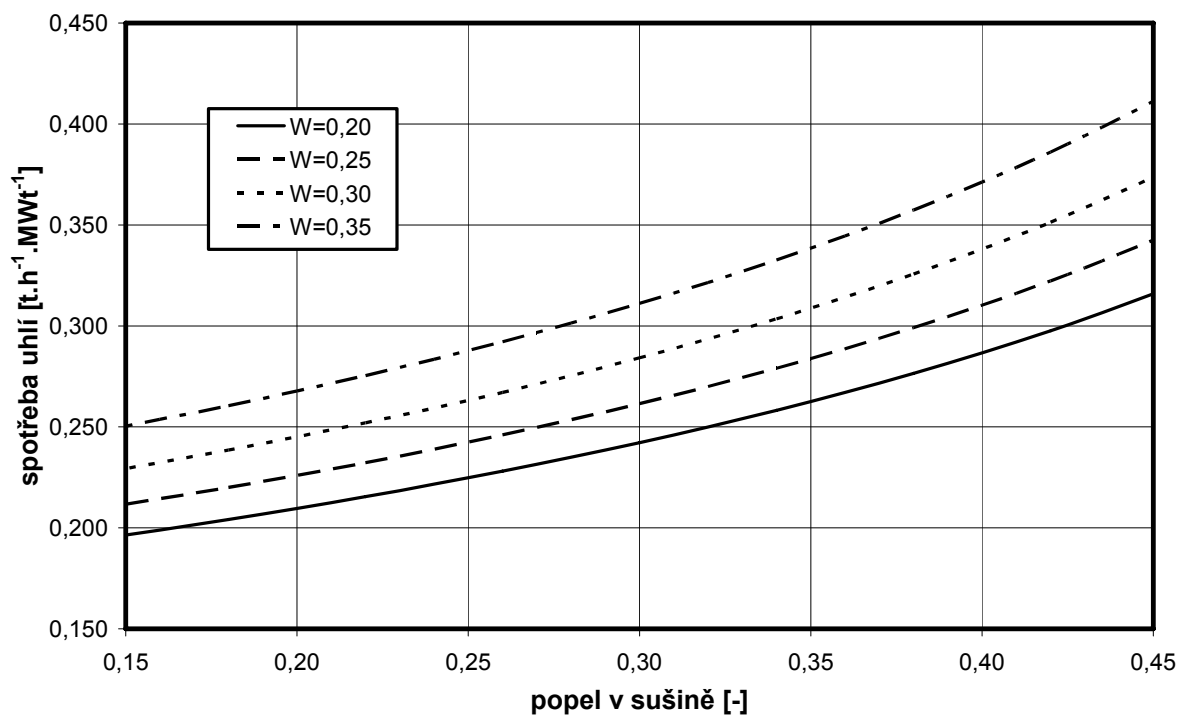
Vlastní elektrická spotřeba kotle zahrnuje elektřinu spotřebovanou na pohon pomocných zařízení kotle, především dopravních tras paliva a mlýnů, ventilátorů a elektrostatických odlučovačů popílku. Nepočítá se do ní příkon napájecího čerpadla, které bývá řešeno jako turbonapajčka. Vlastní spotřeba kotle se významnou měrou podílí na celkové vlastní spotřebě bloku, a tím ovlivňuje výslednou čistou účinnost elektrárny. Je zřejmé, že velikost vlastní

spotřeby kotle bude záviset na množství spáleného paliva, tedy na účinnosti kotle, budou ji však ovlivňovat i konkrétní vlastnosti spalovaného uhlí, především obsah popela a vody, které budou ovlivňovat výsledné hmotnostní toky médií.

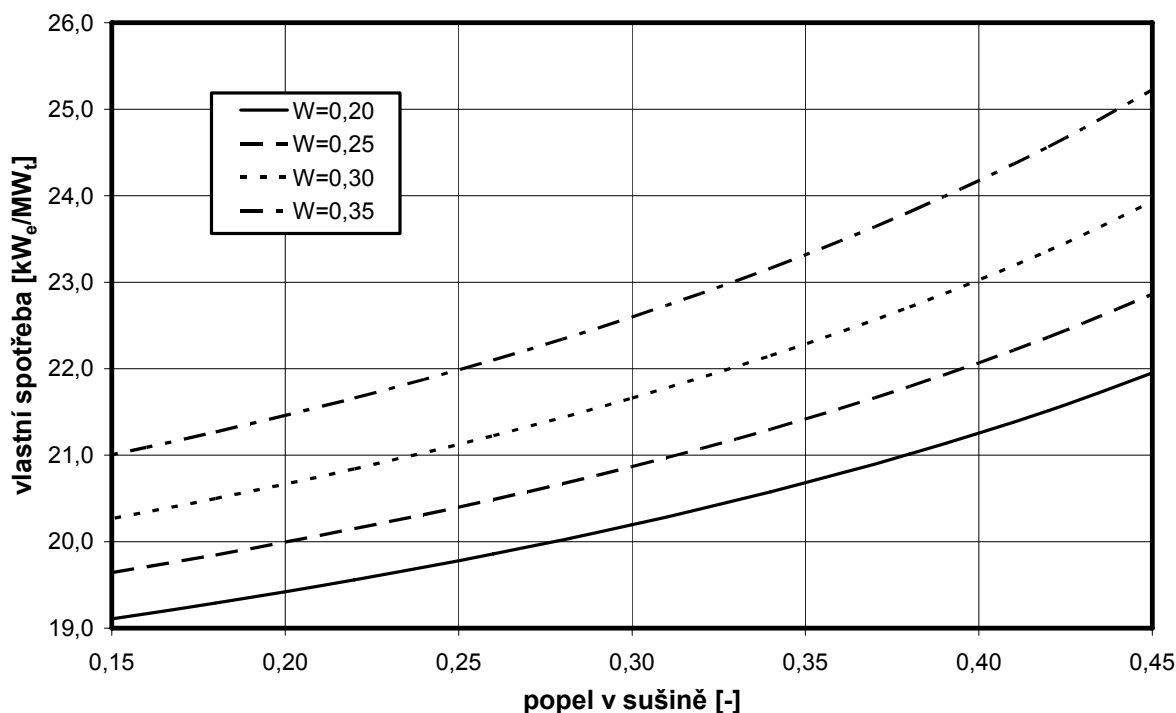
Vyhodnocení vlastní spotřeby kotlů pro připravované nové bloky EPOČ bylo provedeno pro obě uvažovaná paliva, jejichž vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4-2. Při výpočtu byla uvažována spotřeba elektřiny na dopravu paliva do kotelny, jeho mletí, příkon vzduchového a spalínového ventilátoru a na odlučovací popílku. Zvolené vstupní parametry pro výpočet uvádí tab. 4-4.

Výchozím podkladem pro vyjádření vlastní elektrické spotřeby kotle byl výpočet spotřeby uhlí zohledňující jeho různou výhřevnost a rozdíl v účinnosti kotle v závislosti na obsahu vody a popela vypočtený v předchozí kapitole. Spotřeba paliva v t/h byla vyjádřena pro 1 MW_t tepelného výkonu kotle, aby byl eliminován vliv rozdílných parametrů a výkonu bloku, který neovlivňuje průběh transformace tepla v kotli. Výsledky výpočtů vlastní spotřeby kotle, která byla analogicky vztažena též na 1 MW_t tepelného výkonu kotle, je možné najít v tab. 4-4. Je z nich zřejmé, že v případě spalování uhlí z dolu Vršany, které vykazuje horší kvalitativní znaky, bude vlastní elektrická spotřeba kotle cca o 12% vyšší.

Podobně jako v účinnosti kotle byly provedeny analogické výpočty vlastní spotřeby pro širší spektrum obsahu vody a popela v hnědém uhlí a výsledky vyneseny do grafů, čímž bylo dosaženo určitého zobecnění. Závislost spotřeby hnědého uhlí na obsahu vody a popela je uvedena v obr. 4-2 a vlastní elektrická spotřeba kotle v závislosti na těchto parametrech v obr. 4-3.



obr. 4-2 Závislost spotřeby hnědého uhlí na obsahu vody a popela

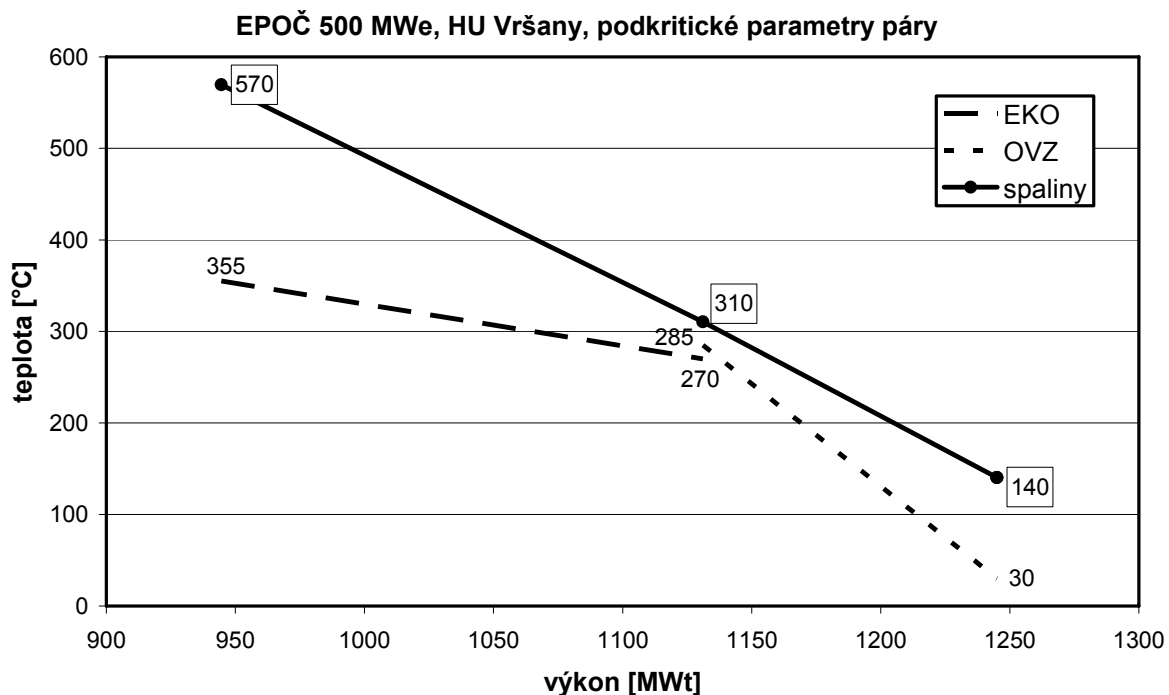


obr. 4-3 Závislost vlastní spotřeby kotle na obsahu vody a popela v HU

4.3 Vliv parametrů páry a teploty napájecí vody na účinnost kotle

U klasického provedení parních elektrárenských kotlů se využívá pro dochlazení spalin před jejich odvodem z kotle ohřívák vody – ekonomizér (EKO) a ohřívák spalovacího vzduchu (OVZ). Většina současných kotlů je navržena tak, aby teplota odcházejících spalin byla s jistou rezervou nad teplotou rosného bodu, většinou se pohybuje kolem 150 až 160°C. Větší dochlazení spalin je spojeno s rizikem kondenzace agresivních kyselých látek na koncové části ohříváku vzduchu (OVZ), což by vyvolalo jeho intenzivní korozi a ztracení životnosti. Rostoucí cena paliv a elektřiny však ekonomicky opodstatňuje toto opatření, a to i za cenu častější výměny OVZ nebo použití dražších korozně odolných materiálů. U nově navrhovaných kotlů se proto počítá s teplotou dochlazení spalin na 130°C, extrémně až na 100°C. Vzniká však problém s uplatněním tohoto nízkopotenciálního tepla, neboť klasickým způsobem, tedy pro předehřev spalovacího vzduchu v OVZ a ohřev napájecí vody, se toto teplo nedá plně využít. Situaci dokumentuje obr. 4-4.

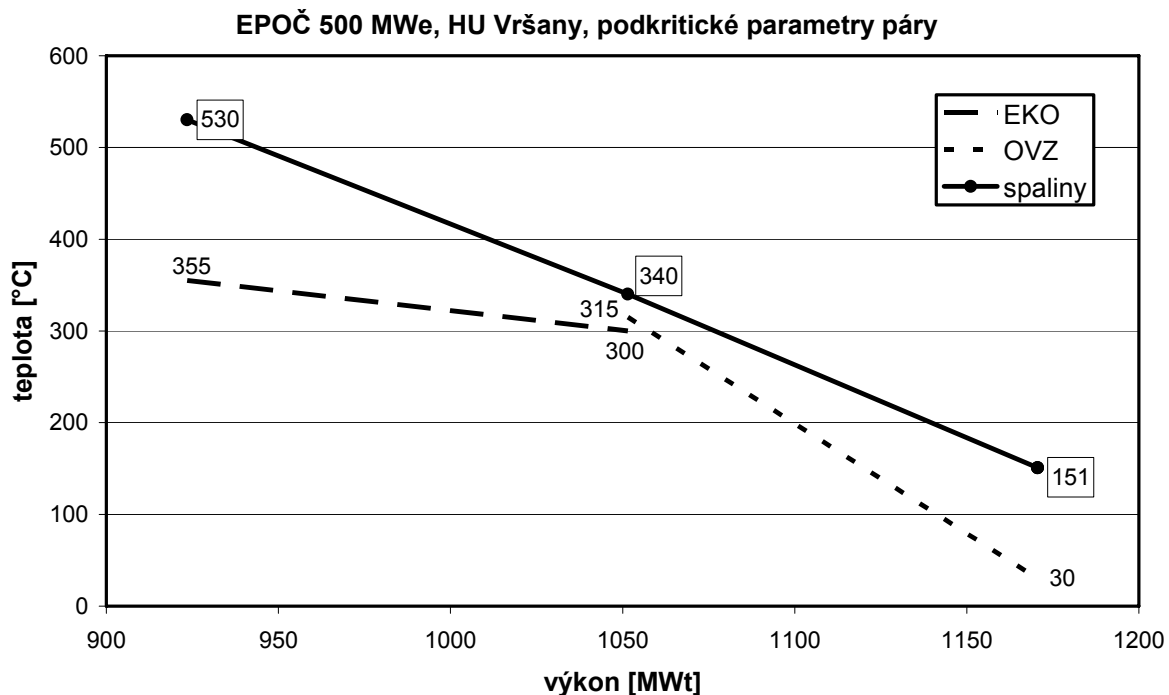
Obrázek zachycuje část tzv. Q-t diagramu, který zachycuje teplotní poměry na jednotlivých výhřevných plochách v kotli v závislosti na jeho výkonu. Pro dokreslení situace stačí uvést pouze výřez zachycující teplotní poměry na koncových plochách kotle, tedy ohříváku vody a vzduchu. Diagram byl vypočten pro návrhovou variantu nového bloku EPOČ s výkonem 500 MWe a podkritickými parametry páry. Palivem je hnědé uhlí z dolu Vršany. Parametry bloku optimalizoval ÚJV Řež a.s., divize Energoprojekt (EGP), ve spolupráci s nímž byl tento problém řešen pro potřeby ČEZ a.s. Z průběhu teplot je jasné



obr. 4-4 Q-t diagram varianty kotle s podkritickými parametry páry

patrné, že kritickým místem, které v podstatě určuje koncovou teplotu spaliny, je konec ohříváku vzduchu resp. začátek ohříváku vody. V tomto bodě vycházejí minimální teplotní spády jak u EKA – zde 40°C, tak i u OVZ – zde 25°C. Hodnota koncového teplotního spádu ovlivňuje velikost potřebné výhřevné plochy výměníku a s jeho zmenšováním velikost výměníku progresivně roste. Určení minimálního koncového spádu by tedy mělo být výsledkem ekonomické optimalizace, při níž by se porovnávala rostoucí cena výměníku se zvýšením jeho výkonu (nebo zlepšením účinnosti kotle). Je třeba připustit, že takováto optimalizace zatím provedena nebyla a ekonomická velikost minimálních teplotních spádů obou ploch byla volena dle obvyklé praxe. Je zřejmé, že pokud bychom chtěli spaliny v kotli dochladiť na nižší teplotu, museli bychom koncový teplotní spád alespoň u jedné plochy zmenšit.

Ke zhoršení podmínek pro dochlazení spaliny v kotli dochází při zvyšování teploty napájecí vody regeneračním ohřevem, což je jedno z klasických karnotizačních opatření R-C cyklu. Vyšší teplota napájecí vody se volí především u bloků s nadkritickými parametry páry. Tuto situaci zachycuje obr. 4-5, kde je znázorněna analogická varianta bloku jako předchozí, avšak s nadkritickými parametry páry. Teplota napájecí vody byla proti předchozímu případu zvýšena o 30°C na 300°C. Zachováme-li velikost koncových teplotních spádů na ohříváku vody a vzduchu jako v předchozím případě, bude možné dochladiť spaliny v kotli pouze na 151°C, což je teplota o 11°C vyšší odpovídající zhoršení účinnosti kotle zhruba o 0,61 %. Toto zhoršení účinnosti kotle by výraznou měrou tlumilo přínos vyšších parametrů páry ke zlepšení účinnosti R-C cyklu, což je neuspokojivé.



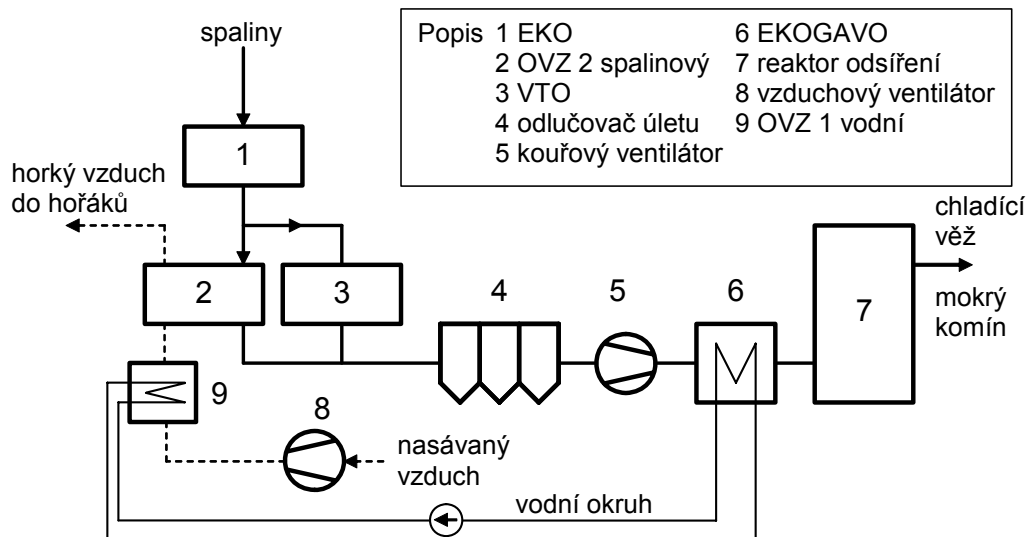
obr. 4-5 Q-t diagram varianty kotle s nadkritickými parametry páry

Je tedy třeba hledat jinou cestu, jak lépe spaliny dochladit a jak jejich nízkopotenciální teplo uplatnit. Je zřejmé, že využití tohoto tepla pro zvýšení předehřevu spalovacího vzduchu není možné. Jediným médiem, které má dostatečně nízkou teplotu, aby mohlo toto teplo efektivně využít, je pouze napájecí voda v nízkotlakém (NT) nebo i vysokotlakém (VT) regeneračním ohřevu. V praxi to znamená, že část tepla pro regenerační předhřev napájecí vody by se získávalo z dochlazení spalin, čímž by se ušetřilo určité množství odběrové páry, která by mohla konat práci ve zbývajících stupních parní turbíny. Tato možnost využití odpadního tepla spalin byla velmi široce analyzována v sousedním Německu v rámci výstavby nových hnědouhelných bloků Schwarze Pumpe a Niederaussem. Její potenciál pro zlepšení účinnosti uhelných energetických bloků je klasifikován jako jeden z nejvyšších. V praxi lze dosáhnout dochlazení spalin na ještě nižší teplotu než je u současných kotlů obvyklé, a tím významně přispět ke zlepšení účinnosti kotle.

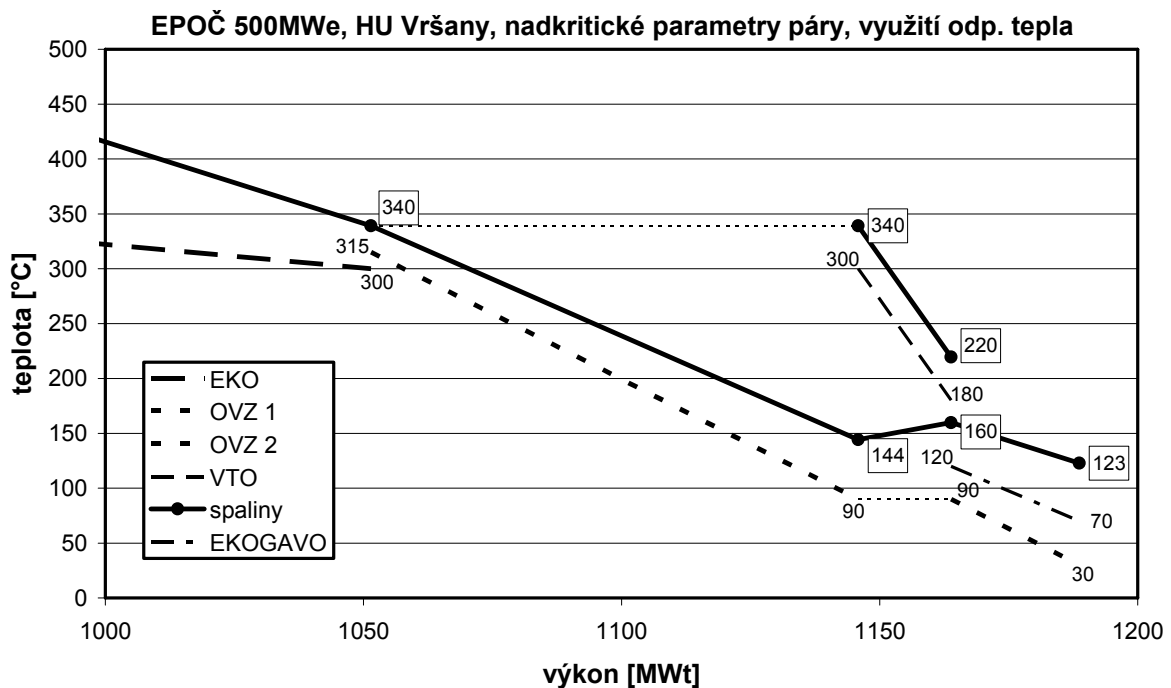
U elektrárny Schwarze Pumpe bylo navrženo využití odpadního tepla pro NT regeneraci. Pro dochlazení spalin byl použit speciální plastový výměník. Regenerační ohřev byl realizován prostřednictvím vřazeného vodního okruhu, který je nezbytný pro lepší zvládnutí tlakových poměrů a celkové dispozice. Plastový výměník spaliny – voda, který je označován jako EKO GAVO, je zařazen za elektrostatické odlučovače popílků před odsíření. Nevýhodou tohoto řešení je uplatnění odpadního tepla spalin pouze pro NT regenerační ohřev plynoucí z jeho zapojení až za kotel.

Kvalitativního zlepšení lze dosáhnout, pokud bude regenerační ohřev napájecí vody prováděn spalinami přímo v kotli. Spalinové regenerační ohříváky

se dají zařadit buď mezi ekonomizér a OVZ nebo do obtoku OVZ, kterým proudí cca 25% spalin. Vyšší teplota spalin umožňuje zařazení i vysokotlakého regeneračního ohřevu, což je z hlediska výsledné účinnosti bloku výhodnější. Pro dochlazení spalin se používá opět EKO, odpadní teplo se však využívá pro první stupeň přehřevu spalovacího vzduchu, čímž je docíleno lepšího rozložení koncových teplotních spádů. S tímto zapojením v různých modifikacích se můžeme setkat u nejmodernějších uhelných bloků, poprvé bylo použito u elektrárny Niederaussem.



obr. 4-6 Schéma využití odpadního tepla spalin navržené pro EPOČ



obr. 4-7 Q-t diagram varianty kotle s nadkritickými parametry páry a s využitím odpadního tepla spalin

tab. 4-5 Porovnání variant navržených pro nový blok EPOČ 500 MW

Varianta		Podkritické parametry páry	Nadkritické parametry páry	Nadkritické parametry, využití odp. tepla
teplota nasávaného vzduchu	°C	30	30	30
teplota přehřevu vzduchu	°C	285	315	315
přebytek řízeného vzduchu		1,02	1,02	1,02
přísátí do MO		0,1	0,1	0,1
přísátí do SK		0,1	0,1	0,1
přísátí do OVZ		0,08	0,08	0,08
přebytek vzduchu za kotlem		1,3	1,3	1,3
teplota spalin za kotlem	°C	140	151	123
průtok páry	t/h	1383,5	1338,5	1338,5
teplota napájecí vody	°C	270	300	300
tlak napájecí vody	MPa	22	35	35
teplota páry	°C	585	600	600
tlak páry	MPa	17,2	28	28
výrobní teplo ostré páry	MW	900,0	795,3	795,3
průtok vratné páry	t/h	1256,9	1115,2	1115,2
teplota vratné páry	°C	384,3	337,95	337,95
tlak vratné páry	MPa	6,39	5,64	5,64
teplota přehřáté páry	°C	600	620	620
tlak přehřáté páry	MPa	6	5,36	5,36
výrobní teplo přehřáté páry	MW	225,5	251,0	251,0
teplo do regenerace	MW	0,0	0,0	18,0
celkový tepelný výkon kotle	MW	1125,5	1046,2	1064,2
výhřevnost uhlí	kJ/kg	11500	11500	11500
spotřeba uhlí	t/h	387,6	362,5	362,7
účinnost kotle (včetně odp. tepla)		0,9090	0,9029	0,9184

Dle požadavku společnosti ČEZ a.s. byla zpracována varianta s využitím odpadního tepla spalin i pro nové bloky EPOČ. Po dohodě s EGP byla propočtena varianta s umístěním vysokotlakého spalinového regeneračního ohříváku do obtoku OVZ, odpadní teplo spalin by bylo pomocí EKOGAVA a přes vřazený vodní okruh využito pro přehřev spalovacího vzduchu v 1. stupni vodního OVZ. Schéma zapojení a Q-t diagram jsou vidět na obr. 4-6 a obr. 4-7.

Z uvedeného Q-t digramu je patrná větší složitost optimalizace tohoto zapojení. Kromě koncových teplotních spádů na EKU a OVZ je zde třeba ještě zohlednit koncové spády na VTO, EKOGAVU a vodním ohříváku vzduchu.

Tyto poměry jsou navíc ovlivněny podílem průtoku spalin přes OVZ a VTO. Ani u tohoto případě nebyla detailní ekonomická optimalizace zatím provedena a teplotní poměry na jednotlivých plochách byly naladěny podle zkušenosti tak, aby byly reálné, což pro ohodnocení potenciálního přínosu tohoto řešení bylo postačující. Dochlazením spalin z původní teploty 151°C na 123°C se podařilo navíc získat 18 MW tepla, které bylo využito pro regenerační ohřev napájecí vody ve spalinovém VTO. Pokud promítneme dochlazení spalin o 28°C do účinnosti kotle, znamenalo by to zlepšení o cca 1,5%. Přínos v účinnosti bloku by byl zhruba poloviční.

Porovnání vstupních dat a vypočtených výsledků všech tří popsaných variant je provedeno v tab. 4-5.

5 Závěry

Z poznatků uvedených v předešlých kapitolách vyplývá, že účinnost uhelného kotle nemůže být chápána jako neměnná vlastnost konkrétního zařízení, ale závisí významnou měrou na specifických vlastnostech spalovaného paliva. V tomto smyslu není postačující kvalitativně rozlišovat uhlí pouze na hnědé a černé, ale je žádoucí blíže charakterizovat složení a výhřevnost příslušného paliva a v souvislosti s hodnotou účinnosti kotle uvádět konkrétní obsah vody a popelovin. Výpočtem pro dva kvalitativně odlišné druhy domácího hnědého uhlí bylo prokázáno, že účinnost kotle se může pro jinak stejné provozní podmínky lišit v řádu jednotek procent. Tento rozdíl je natolik významný, že prakticky vylučuje možnost jednoznačného zobecnění účinnosti kotlů určitého typu a technické úrovně. Tento fakt je doložen grafickým vyjádřením závislosti účinnosti kotle na obsahu vody a popelovin v hnědém uhlí.

Rozdíl ve vlastnostech uhlí je třeba dále zohlednit při vyjadřování vlastní elektrické spotřeby uhelného kotle, potažmo pak i celé elektrárny. Dle konkrétního obsahu vody a popela v uhlí se může vlastní spotřeba kotle ovlivnit velikost vlastní spotřeby bloku v řádu desetin procentního bodu z čisté výroby elektřiny resp. účinnosti bloku. Rovněž pro vlastní spotřebu kotle byla určena závislost její velikosti na obsahu vody popela v uhlí.

Následně byl vyhodnocen vliv rostoucích parametrů páry a teploty napájecí vody na dosažitelnou účinnost kotle. Lze konstatovat, že tato opatření, která jednoznačně zvyšují účinnost tepelného oběhu parní elektrárny, zhoršují podmínky pro dochlazení spalin v kotli a při použití klasické koncepce kotle mohou dokonce limitovat jeho dosažitelnou účinnost. Řešením je zařazení regeneračního ohřevu napájecí vody spalinami do tepelného schématu bloku, které pak připouští větší dochlazení spalin, a tím potenciální zvýšení účinnosti kotle resp. celé elektrárny. Možné technické provedení a energetický přínos tohoto opatření je dokumentován na návrhových variantách nových bloků, jejichž výstavbu plánuje společnost ČEZ a.s. v lokalitě Počerady.

Literatura

- [1] BENESCH W.A.: Planning New Coal-fired Power Plants. VGB PowerTech 6/2001 s.37-44
- [2] HRDLIČKA F., DLOUHÝ T., KOLOVRATNÍK M.: Technicko-ekonomické parametry moderních uhelných bloků. Studie ČVUT FS, Ú12107.2, Praha 2004
- [3] DLOUHÝ T., KOLOVRATNÍK M.: Vliv složení uhlí na účinnost kotle. Sborník konference „Spalování a životní prostředí 2004“, s. 215-219, VŠB Ostrava 2004

Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

Datum a místo narození	2.1.1960, Beroun
Současné pracovní zařazení	odborný asistent Fakultě strojní ČVUT Praha
Odborné zaměření	Energetika
Užší specializace	spalování a sušení paliv, kotle, ekonomika energetiky
Vzdělání	1975 - 79 gymnázium 1979 - 84 Fakulta strojní, ČVUT v Praze 1987 - 93 aspirantura, ČVUT v Praze
Akademické tituly	Ing. 1984 Fakulta strojní, ČVUT v Praze CSc.1993 v oblasti spalování, FS ČVUT
Praxe	1985 - 92 výzkumný asistent, FS ČVUT 1992 - odborný asistent na ústavu mechaniky tekutin a energetiky FS ČVUT Praze
Zahraniční praxe	1995 - 98 postgraduální diplom na Glasgow Caledonian University (GB)
Jazykové znalosti	čeština, angličtina, ruština