

Симеон Ока<sup>1</sup>, Борислав Грубор<sup>1</sup>, Драгољуб Дакић<sup>1</sup>, Младен Илић<sup>1</sup>,  
Василије Мановић<sup>2</sup>, Милић Ерић<sup>1</sup>, Милијана Пајрика<sup>1</sup>, Никола Ока<sup>1</sup>,  
Срђан Белошевић<sup>1</sup>, Раско Младеновић<sup>1</sup>, Ненад Црномарковић<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт за нуклеарне науке „Винча”, Београд

<sup>2</sup> Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд

## Испитивање подобности лигнита „Колубара” и „Ковин” за сагоревање у котловима са циркулационим флуидизованим слојем

Стручни рад

UDC: 662.642:662.992.8-912

BIBLID: 350-218X, 30 (2004), 1-4, 83–103

У раду су даћи резултати испитивања њонашања лигнита „Колубара” и „Ковин”, при сагоревању у флуидизованом слоју, извршена за њошребе Електропривреде Србије, са циљем да се добију подлоге за размашрање градње коилова са сагоревањем у циркулационом флуидизованом слоју у процесу ревитализације старих блокова. Испитивања су извршена коришћењем оригиналне методологије уведене од стране Лабораторије за термостехнику и енергетику Института за нуклеарне науке „Винча”, и проверене испитивањем више десетина домаћих угља. Посебна пажња у овом испитивању посвећена је проблему коришћења података добијених у мекурасном флуидизованом слоју за анализу њонашања лигнита при сагоревању у коиловима са циркулационим флуидизованим слојем.

Испитивана су четири квалитетна лигинита „Колубара”, њоилоине моћи 2,5–8,5 MJ/kg, и са различитим садржајем њейела, и више квалитетна лигинита „Ковин” у истом оисежу њоилоине моћи. Испитивања су обављена у три фазе: (1) шехничка и елементарна анализа, и одређивање карактеристичних шемпературе омекшавања њейела стандардним њосиуком и у флуидизованом слоју, (2) испитивање процеса фрагментације честица угља, одређивање брзине сагоревања и шемпературе старша, одређивање везивања сумора од стране њейела, и (3) испитивање њонашања угља у стационарним условима сагоревања у њилой-њосиројењу.

Резултати су њоказали да су испитивани лигинити веома њогодни за сагоревање у коиловима са циркулационим флуидизованим слојем. Добијени резултати њредстављају подлогу за израду студије ошравданоси и избор коилова свейских њроизвођача.

Кључне речи: сагоревање, лигинит, шехнологија сагоревања у флуидизованом слоју, испитивање угља, њонашање угља при сагоревању

## Увод

Електропривреда Србије (ЕПС) је финасирала експерименталну студију *Испитивање могућности примене сагоревања у циркулационом флуидизованом слоју (ЦФС) у котловима у ЕПС* [1–3], са циљем да се размотри оправданост примене котлова са сагоревањем у циркулационом флуидизованом слоју (СЦФС) у термоелектранама (ТЕ) у Србији, приликом њихове ревитализације.

У овом раду приказани су најважнији резултати прве фазе ове Студије, у којој су извршена испитивања подобности сагоревања лигнита колубарског и ковинског басена за сагоревање у котловима СЦФС.

## Циљеви студије

Сагласно Програмском задатку, имајући у виду експлоатационе и рударско-геолошке карактеристике Колубарског басена као и потребу за искоришћењем резерви угља (1) топлотне моћи од 3500–5300 kJ/kg и (2) топлотне моћи испод 3500 kJ/kg, због чега је неопходно размотрити примену технологије која је мање осетљива на промене квалитета угља, Студија треба да:

- створи подлоге за избор и анализу идејно-техничких решења котлова СЦФС и њихово техно-економско упоређивање са конвенционалним технологијама сагоревања угља,
- омогући равноправан третман технологије сагоревања у флуидизованом слоју при разматрању продужења радног века блокова ТЕ ЕПС,
- укаже на утицај карактеристика угља и режима рада котла на избор концепције, конструкцију и основне параметре рада котла СЦФС и омогући њихов оптимални избор, и
- покаже предности сагоревања лигнита у котловима са флуидизованим слојем у ТЕ ЕПС, али и у котловима за производњу енергије у индустрији и даљинском грејању.

## Угљеви одабрани за испитивање

За испитивање су изабрани следећи угљеви:

- (а) четири квалитета равнoг лигнита Колубарског басена који ће се користити за ревитализоване блокове на локацији ТЕ „Колубара” (ТЕКО) А и ТЕ „Никола Тесла” (ТЕНТ): угаљ више, средње и ниже топлотне моћи и раслојени угаљ ниске топлотне моћи (коришћење раслојеног угља значајно би повећало расположиве резерве Колубарског басена), и
- (б) репрезентативни узорак Ковинског угља, који би се користио за потенцијалне термо блокове на овој локацији или у котловима мање снаге у индустрији и системима даљинског грејања.

У току испитивања коришћена је једна врста кречњака из рудника у околини колубарског и ковинског угљеног басена, и испитана ефикасност одсумпоравања са и без додавања кречњака, и могућност задовољавања препорука Европске уније за дозвољену емисију SO<sub>2</sub>, *in situ* везивањем оксида сумпора са кречњаком у ложишту котла СЦФС.

### Методологија испитивања

За испитивање угља коришћена је *Методологија ИТЕ-ИБК* [1, 4–6], развијена у Лабораторији за термотехнику и енергетику Института за нуклеарне науке „Винча”. Методологија је проверена испитивањем више од 20 угљева различитог порекла и квалитета и 9 врсти кречњака са територије бивше Југославије, користећи експерименталну базу у Лабораторији за термотехнику и енергетику, која се састоји од више лабораторијских ложишта са флуидизованим слојем и пилот-постројења снаге 200 kW<sub>t</sub>.

Методологија је развијена, коришћена и проверена за утврђивање подобности угљева за *сагоревање у мехурастом* флуидизованом слоју (СМФС), те су због тога претходно анализирани сличности и разлике услова СМФС и СЦФС, и оправданост примене методологије за одређивање подобности угљева за СЦФС [7].

### Одређивање репрезентативног блока угља за испитивања

На основу анализе рударско-геолошких карактеристика и динамике откопавања и квалитета угља копова ПК „Тамнава” (источно поље и поље Де) и заменских копова („Велики Црљани”, „Тамнава” – јужно поље и поље Е) Колубарског басена и Ковинског басена (поље А и поље Бе), као и степена истражености и геолошких резерви, стручна екипа ЕПС [8], извршила је избор репрезентативних блокова угља за испитивања. Сви узорци достављени су у пластичним кесама, по 250 kg гранулације 20 mm+0 (крупан), и дробљено на 3 mm+0 (ситан), по 50 kg.

#### *Узорци угља лежишта „Колубара”*

Програмским задатком било је одређено да узорци за испитивање лигнита „Колубара” имају доњу топлотну моћ у границама: класа А 8 MJ/kg, класа Бе 6,5 MJ/kg, класа Це 5 MJ/kg и класа Де 4 MJ/kg (раслојени угаљ ниске топлотне моћи).

**Узимање и припрема узорака класе А (8,0 MJ/kg).** Са дробилане је узиман угаљ допреман са копа „Тамнава” – источно поље, када је роторни багер Ге-2 радио у висинском блоку, у трећем резу, откопавајући компактан угаљ, без визуелно уочљивих минералних примеса. Хомогенизиран узорак је подељен на два дела (половине). Један део је просејан на решету 35 mm, а други на решету 20 mm. Добијени су узорци доње топлотне моћи 7,05–8,8 MJ/kg.

**Узимање и припрема узорака класе Бе (6,5 MJ/kg).** Узорци су узети на површинском копу „Тамнава” – источно поље, откопавањем угља багером глодаром Ге-2, из прве и друге подетаже у висинском блоку. Откопана су три узорка, сваки од око 7–8 t, и истоварном багерском траком посебно сипани на три гомиле. Из сваке гомиле је утоварном лопатом узета око 1 t узорка и послата у дробилану „Тамнава”. Узети узорци у знатној мери су одступали од потребних вредности топлотне моћи и зато је основни узорак коригован додавањем гранулације угља 20 mm, из узорка друге подетаже ( $Q_i^d$  2,3 MJ/kg). Добијени су узорци доње топлотне моћи 5,7–6,96 MJ/kg.

**Узимање и припрема узорака класе Це (5,0 MJ/kg).** Микролокација узимања узорака (простор истражне бушотине Rqr–110, из кровинског дела угља које репрезентује први интервал на профилу бушотине кроз угаљ), одређена је на основу података о структури и квалитету угља из Елабората о резервама угља површинског копа „Тамнава” – источно поље и стања радова на откривци и откопавању угља (оперативни план копа, мај 2000.). Са обележене микролокације узорак угља је узет хидрауличким багером копањем дубинског рова са повлатног планума до укупне дубине  $H = 3$  m. Дубинским копањем су узета два појединачна узорка масе од око 800 kg сваки, и мешањем формиран композитни узорак потребне доње топлотне моћи 4,3–5,55 MJ/kg.

**Узимање и припрема узорака класе Де (4,0 MJ/kg).** Багером су узета два појединачна узорка од око 10 t, из повлатног раслојеног угља (прва подетажа), и од угља са глиновитим јаловинским прослојком (трећа подетажа). Од ових узорака формиран је основни узорак мешањем у односу 2:1 и послат у дробилану. Узорак је имао доњу топлотну моћ 3,85–4,12 MJ/kg.

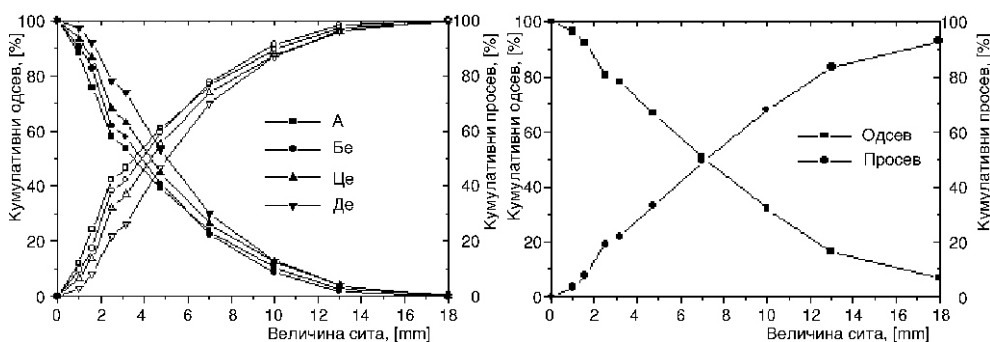
#### Узорци угља лежишта „Ковин”

Репрезентативни узорак лигнита из лежишта „Ковин” формиран је као композитни узорак са депоа класирнице мешањем одвојених фракција у одговарајућем односу, због немогућности узимања узорака угља директно из лежишта. Узорак је имао доњу топлотну моћ око 9,5 MJ/kg.

### Физичко-хемијске особине испитиваних угљева

#### Техничка и елементарна анализа

За све испитиване узорке урађена је стандардна техничка и елементарна анализа и хемијска анализа пепела. Посебно је урађена гранулометријска анализа честица мањих од 1 mm. На сл. 1. дат је гранулометријски састав репрезентативних узорака лигнита „Колубара” класе А, Бе, Це и Де и репрезентативног узорака лигнита „Ковин”.



Слика 1. Кумулативни одсев и кумулативни просев: лево – репрезентативни узорак угља „Колубара” класе А – Де, десно – репрезентативни узорак угља „Ковин”

Гранулометријски састав свих испитиваних класа угља „Колубара” је сличан. Разлике су значајније у уделу честица мањих од 1 mm у лигниту „Колубара”. У испитиваним узорцима удео честица мањих од 1 mm у лигниту „Колубара” био је значајан: класа А – 16,6%, класа Бе – 14,5%, класа Це – 19,7% и класа Де – 5,8%, а у средњем узорку угља „Ковин” – 3,62%. Међу ситним честицама свих класа угља „Колубара” највише су заступљене честице 400–630  $\mu$ m (од 31,4% код угља класе Бе до 44,97% код угља класе Де), а најмање честице мање од 45  $\mu$ m (око 1%). Угаљ „Ковин” има мали удео ситнијих фракција (испод 200  $\mu$ m), јер је то практично прани угаљ.

Значајан удео честица мањих од 1 mm у котловима СЦФС доприноси већој ефикасности сагоревања (само честице мање од 45  $\mu$ m не могу бити ухваћене у циклонима). Међутим, и котлови са мехурастим флуидизованим слојем морају имати систем за повраћај несагорелих честица ради постизања високог степена ефикасности сагоревања.

У табл. 1. дате су основне карактеристике репрезентативних узорака испитиваних угљева. Највећи садржај укупне влаге угља „Колубара” има узорак класе А (50,52%), па затим следе, узорак класе Бе, узорак класе Це, и најмањи садржај укупне

**Таблица 1. Карактеристике репрезентативних узорака испитиваних угљева (доставно стање)**

Карактеристике		Угаљ „Колубара”				Угаљ „Ковин”	
		класа А	класа Бе	класа Це	класа Де		
		Са укупном влагом					
Техничка анализа	Груба влага, [%]	43,00	32,86	35,03	32,89	37,32	
	Аналитичка влага, [%]	7,53	9,84	6,47	5,13	8,20	
	Укупна влага, [%]	50,52	42,70	41,50	38,02	45,52	
	Пепео, [%]	15,35	24,89	30,52	37,06	9,77	
	Испарљиве супстанције, [%]	19,27	19,62	17,04	16,64	26,36	
	Коксни остатак, [%]	30,21	37,69	41,46	45,33	28,12	
	Фиксни угљеник, [%]	14,86	12,79	10,94	8,27	18,35	
	Сагорљиве супстанције, [%]	34,13	32,41	27,98	24,92	44,72	
	Сумпор [%]	укупни	0,35	0,16	0,53	0,88	0,88
		сулфатни	0,05	0,01	0,10	0,07	0,07
		пиритни	0,00	0,00	0,00	0,42	0,42
		органични	0,30	0,15	0,43	0,39	0,39
	Горња топлотна моћ, [MJ/kg]	8.776	7.779	6.073	4.226	10.179	
	Доња топлотна моћ, [MJ/kg]	7.558	6.815	5.055	3.180	9.064	
Елементарна анализа	Угљеник, [%]	21,32	–	–	14,17	29,61	
	Водоник, [%]	1,95	–	–	2,10	2,35	
	Азот, [%]	0,41	–	–	0,35	0,31	
	Сумпор, [%]	0,41	–	–	0,40	0,78	
	Кисеоник, [%]	10,04	–	–	7,90	11,67	

влаге има узорак класе Де (38,02%). Садржај пепела, за основу сув, креће се од 31,01% код класе А до 59,79% код класе Де. Разлика у садржају пепела између испитиваних класа угља велика је и за основу укупна влага, и креће се од 15,35% код угља класе А до 37,06% код угља класе Де. Садржај укупне влаге угља „Ковин” је 37,32%, што је мање него у репрезентативним узорцима појединих класа угља „Колубара”. Садржај пепела, за основу сув, знатно је мањи (17,92%) од садржаја пепела у репрезентативним узорцима угља „Колубара”.

#### *Температуре топовости и температуре агломерације пепела у флуидизованом слоју*

Карактеристичне температуре топовости пепела одређене стандардном методом дате су у табл. 2, заједно са температуром агломерације пепела и песка и максималном препорученом радном температуром флуидизованог слоја, које су одређене испитивањима у експерименталном ложишту. Пепео лигнита „Колубара” има ниску температуру топовости, нижу од пепела угља „Ковин”.

Угљеви „Колубара” и „Ковин” су слични и то се пре свега односи на гориву материју. Највеће разлике између ових угљева су последица различитог садржаја јаловине, а садржај сумпора је знатно већи у угљу Ковин. Угаљ „Ковин” за разлику од угља „Колубара” садржи и пиритни сумпор.

**Таблица 2. Карактеристичне температуре топовости пепела [ С]**

Узорак	„Колубара” класа А	„Колубара” класа Бе	„Колубара” класа Це	„Колубара” класа Де	„Ковин”
Почетак синтеровања	975	1.015	980	965	970
Тачка омекшавања	1.190	1.220	1.185	1.220	1.155
Тачка полуплоте	1.315	1.420	1.370	1.440	1.195
Тачка разливања	>1.450	>1.450	>1.450	>1.450	1.285
Температура агломерације	1.165	1.160	1.165	1.160	1.180
Радна температура флуидизованог слоја	883	878	891	894	945

#### **Понашање угља у флуидизованом слоју**

Експериментално су одређене: склоност честица угља ка фрагментацији и критични пречник фрагментације, температура старта, брзина сагоревања и степен везивања сумпора у пепелу.

#### *Критични пречник фрагментације честица угља*

Испитана је примарна фрагментација угљева на температури флуидизованог слоја 600 и 800 °С, за 4 гранулације сваког угља:  $4,76 \text{ mm} < d_{\xi} < 7 \text{ mm}$ ,  $7 \text{ mm} < d_{\xi} < 10 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ mm} < d_{\xi} < 13 \text{ mm}$  и  $13 \text{ mm} < d_{\xi} < 18 \text{ mm}$ .

Критични пречник примарне фрагментације, тј. пречник честица испитиваних угљева при коме је вероватноћа појаве распадања велика дат је у табл. 3. После распадања ново настале честице имају знатно мањи средњи пречник (3–5 mm), зависно од почетне гранулације.

Ковински и колубарски угљеви имају релативно велик критични пречник примарне фрагментације, па је изражена могућност да део пепела остане у слоју и да се ту гомила током континуираног рада реалних постројења. Котао мора имати систем за извлачење материјала слоја, његово хлађење, просејавање и враћање у слој одговарајуће, радне, гранулације песка/пепела.

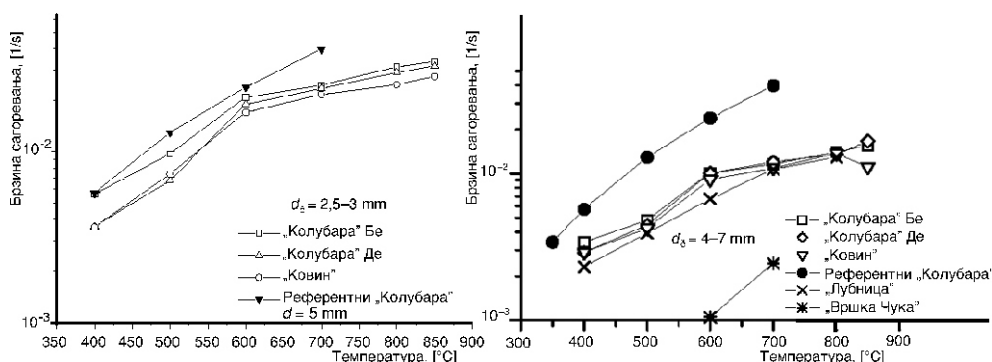
Котао ће имати брз одговор ложишта на промену протока горива и брзо праћење промене оптерећења, јер ће средња величина честица при сагоревању бити мања од  $d_{\text{крит}}$ , тј. око 3–5 mm.

**Таблица 3. Критични пречник фрагментације угљева „Колубара” и „Ковин”**

Угаљ	$d_{\text{крит}}$ [mm]	
	600 °C	800 °C
„Колубара”	7,3	8,0
„Ковин”	4,7	5,6

#### *Брзина сагоревања и температура сгарива коїла*

Одређивање брзине сагоревања је извршено за класе Бе и Де угља „Колубара” и за угаљ „Ковин”, на температурама 400, 450, 500, 600, 700, 800 и 850 °C, и за три фракције честица угља: 2,5–3,15 mm, 4,7–7 mm и 10–13 mm. Брзине сагоревања честица угља „Колубара” класе Бе и Де величине 2,5 и 4–7 mm су на сл. 2. упоређене са брзином сагоревања референтног угља „Колубара”.



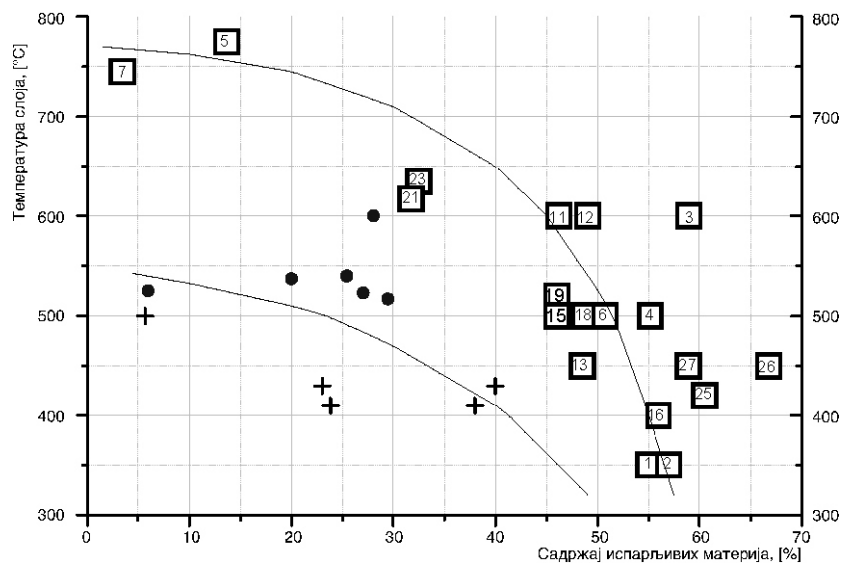
**Слика 2. Брзина сагоревања угља „Колубара” класе Бе и Де и угља „Ковин” упоређено са брзином сагоревања референтног угља „Колубара”**

Минимална радна температура од 600 °C је довољно висока за интензивно сагоревање испитиваних лигнита. Пошто је температура паљења угљен-монооксида и угљеводоника преко 600 °C, препоручује се минимална радна температура најмање 650 °C за угљеве „Колубара”, а 680 °C за угаљ „Ковин”.

Пошто су на вишим температурама (>600 °C) разлике у брзини сагоревања и времену сагоревања минималне између класа Бе и Де угља „Колубара”, а органска маса свих испитиваних класа угља „Колубара” слична, онда се за класу Це може рећи да ће се понашати исто као и друге две класе тог угља. Класа А угља је навалитетнија од четири испитиване класе, и по својим карактеристикама је врло блиска референтном угљу „Колубара”, а боља од класе Бе.

Избор температуре старта дозирања горива може да се изврши поређењем брзина сагоревања са брзином сагоревања референтног угља „Колубара” (величине честица 5 mm). Брзине сагоревања три испитивана угља гранулације 4–7 mm (сл. 2, десно), указују да би температура старта могла бити 420–450 °C.

Процена температуре старта могућа је и коришћењем дијаграма, који показује везу између садржаја испарљивих горивих материја и температуре старта дозирања горива [6, 9], који је добијен испитивањима великог броја угљева *Методологијом ИТЕ-ИБК*. Према садржају горивих испарљивих материја испитиваних угљева („Колубара” класа Бе – 60,5%, Де – 66,8% и „Ковин” – 59%), могу се, такође, предложити температуре старта 420–450 °C (сл. 3). За испитивани угаљ класе Де, због велике количне минералних материја предложена је температура старта 450 °C. Угаљ „Ковин” спада у мање реактивне лигните, и упркос малом садржају минералних материја предлаже се температура старта 450 °C.



Слика 3. Температуре старта дозирања различитих врста горива у зависности од садржаја испарљивих материја за основу сув, без пепела (daf)  
 25 – угаљ „Колубара” класа Бе, 26 – угаљ „Колубара” класа Де,  
 27 – угаљ „Ковин”



### *Степен адсорпције SO<sub>2</sub> њеџелом*

Испитивања су обављена за угљеве „Колубара” класе Бе и Де и „Ковин”, са узорцима гранулације: „Колубара” – 1,0–1,6 mm, 2,5–3,15 mm и 4,76–7 mm, и „Ковин” – 0–5,0 mm, 5–15 mm и 15–30 mm.

Степен самоодсумпоравања испитиваних узорака је 40–60%, зависно од гранулације. Ове вредности су уобичајене за млађе угљеве, због повољног моларног односа Ca/S и великог удела волатила. Самоодсумпоравање се одвија претежно у честици угља при сагоревању коксног остатка, SO<sub>2</sub> ослобођен у волатилима не учествује у процесу. Резултати су корисни при конструкцији реалног ложишта са флуидизованим слојем:

- потребна количина кречњака је мања, јер треба узети у обзир само преостали сумпор који није задржан у пепелу током сагоревања угља,
- дозирање угља у слој је ефикасније, јер ће део H<sub>2</sub>S настао током деволатилизације пре изласка из слоја оксидирати до SO<sub>2</sub> и реаговати са CaO у осталим честицама пепела,
- рецикулацијом летећег пепела знатно се повећава ефикасност самоодсумпоравања јер се користи неискоришћени CaO који одлази из слоја са честицама летећег пепела, и
- ефикасније је изузимање инертног материјала (са пепелом) на што нижој тачки слоја, јер се тако одстрањује углавном јаловина, која и не садржи активни CaO.

### **Карактеристике испитиваних угљева при стационарном сагоревању у флуидизованом слоју**

Испитивања су извршена у пилот-постројењу снаге 200 kW<sub>t</sub>, попречног пресека ложишта 300 × 300 mm<sup>2</sup>, висине 2,5 m, у условима блиским условима у реалном котлу. Испитана су два квалитета угља „Колубара” – угаљ средње топлотне моћи (класа Бе) и раслојени угаљ ниске топлотне моћи (класа Де), и репрезентативни узорак угља „Ковин”. Претпостављено је да ће за угљеве „Колубара” А и Це бити могуће извршити процену њиховог понашања, на основу сличности њиховог порекла и састава и на основу резултата експеримената у малим лабораторијским ложиштима.

У табл. 4. дате су основне карактеристике угљева испитиваних у пилот-постројењу.

Узорци означени као „крупан” убацивани су при испитивањима на површину слоја, а узорци „ситан” дозирани су у ложиште пнеуматским путем испод површине слоја. Извршено је 12 експеримената, 6 са дозирањем на слој и 6 са дозирањем испод површине слоја (просушеним на <30% влаге). Сваки од ових 12 експеримената почео је без додавања кречњака, и затим настављен са истим радним параметрима са додавањем кречњака, ради одсумпоравања.

**Таблица 4. Основне карактеристике репрезентативних узорака испитиваних угљева**

Карактеристике		Угаљ					
		„Колубара”				„Ковин”	
		класа Бе крупан	класа Бе ситан	класа Де крупан	класа Де ситан	крупан	ситан
Техничка анализа	Укупна влага, [%]	42,70	29,06	38,02	28,12	45,52	29,93
	Пепео, [%]	24,89	29,27	37,06	45,61	9,77	24,09
	Испарљиво, [%]	19,62	25,77	16,64	17,71	26,36	27,08
	Коксни остатак, [%]	37,69	45,81	45,33	54,15	28,12	46,99
	C <sub>фик</sub> [%]	12,79	16,54	8,27	8,54	18,35	22,90
	Сагорљиво, [%]	32,41	42,31	24,92	26,26	44,72	49,92
	H <sub>d</sub> [MJ/kg]	6.815	7.500	3.180	5.640	9.064	11.200
Елементарна анализа	C [%]	17,45*	22,07	14,17	16,58	29,61	32,84
	H [%]	2,025*	2,56	2,10	2,46	2,35	2,64
	N [%]	0,38*	0,48	0,35	0,41	0,31	0,34
	S [%]	0,24*	0,30	0,40	0,47	0,78	0,90
	O [%]	9,0*	11,38	7,90	9,24	11,67	12,97

\* Израчунато интерполирањем резултата добијених за лигнит „Колубара” А и Це

*Распоред температуре и распоред генерације  
топлоте по висини ложишта*

У свим испитиваним режимима вишак ваздуха је био око 2. У слоју није био постављен уроњени измењивач, али је ипак измерен пораст температуре по висини слоја 5–15 С. При дозирању угља испод површине пораст температуре слоја је био већи (неколико степени) него при дозирању угља на површину слоја. Измерене температуре изнад слоја биле су знатно више од температура у слоју, због изолованих зидова ложишта и сагоревања ситних честица и испарљивих материја изнад слоја. При дозирању угља испод површине слоја, пораст температуре изнад слоја је био већи него при дозирању на слој, због великог процента честица мањих од 1 mm (40–50%) у гранулацији 0–2,5 mm, која је коришћена за дозирање испод површине слоја. Највиша температура слоја измерена је на око 0,4 m изнад површине слоја, затим температура опада због губитака топлоте у околину.

У табл. 5 дате су температуре измерене у слоју и изнад слоја и распоред генерисане топлоте. Важно је запазити да у режиму мехурасте флуидизације, и поред слабијег интензитета мешања, због велике реактивности испитиваних лигнита, преко 90% угља сагорева у слоју.

*Састав продуката сагоревања и емисија CO<sub>2</sub>*

Додавањем око 5% кречњака у односу на масу горива која се убацује у ложиште, концентрација SO<sub>2</sub> је при дозирању угља у слој била 4–5 пута мања, а при дози-

**Таблица 5. Расподела генерисане топлоте на основу измерених температура**

Угљ		Максимална температура у слоју [ C]	Максимална температура изнад слоја [%]	Приближна количина топлоте ослобођене у слоју [%]	Приближна количина топлоте ослобођене изнад слоја [%]
„Колубара”	Класа Бе, на слој	850	870	97,5	2,5
	Класа Бе, у слој	870	950	91	9
	Класа Де, на слој	830	900	92	8
	Класа Де, у слој	860	950	90	10
„Ковин”	На слој	850	875	97	3
	У слој	840	870	96	4

рању на слој 2–3 пута мања од могуће количине израчунате на основу садржаја сумпора у угљу. У експериментима без дозирања кречњака, и при дозирању угља на површину слоја и испод површине слоја, концентрација SO<sub>2</sub> била је нешто већа, или је била на граници дозвољених концентрација. Оптималним избором врсте кречњака, његове гранулације и количине може емисија SO<sub>2</sub> још више да се смањи.

Коришћен је кречњак са великим процентом честица мањих од 1 mm ( $d_{sr} = 0,301$  mm), због чега је степен одсумпоравања мањи од очекиваног. И поред тога, емисија SO<sub>2</sub> је била мања од прописаних Правилником о граничним вредностима (230 ppm, за котлове снаге >300 MW). Концентрација NO<sub>x</sub> такође је мања од дозвољених (табл. 6).

**Таблица 6. Састав продуката сагоревања на 7% O<sub>2</sub> при дозирању угља на слој**

Експеримент	O <sub>2</sub> [%]	Концентрација сведена на 7% O <sub>2</sub>			
		CO <sub>2</sub> [%]	CO [ppm]	SO <sub>2</sub> [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]
1	10,85	12,42	3.821	280	109
2*	10,92	12,51	4.048	171	50
3	9,95	11,74	7.470	363	71
4*	9,95	11,74	5.701	133	107
5	10,27	12,45	4.257	445	89
6*	10,33	12,45	4.598	131	108

\* У режимима 2, 4 и 6 додаван је кречњак у ложиште ради везивања са SO<sub>2</sub>

Неповољан гранулометријски састав коришћеног кречњака узрок је чињенице да је и поред великог односа  $Ca/S$  (чак до 6,6) степен одсумпоравања био скроман, свега 60–70%. У котловима СМФС у експлоатацији, већ са односима  $Ca/S = 2-3$  постиже се степен одсумпоравања 80–90% [6]. Интензивно одношење честица кречњака из слоја је разлог због којег није могуће уочити зависност степена одсумпоравања од односа  $Ca/S$  (табл. 7).

**Таблица 7. Степен одсумпоравања и молски однос  $Ca/S$  у експериментима са додавањем кречњака у ложиште**

Угаљ	Дозирање	Проток угља [kg/h]	Проток кречњака [kg/h]	Молски однос $Ca/S$ 1/1	Степен одсумпоравања [%]
„Колубара” класа Бе	На слој	30,96	1.548	6,60	38
„Колубара” класа Де	На слој	35,28	1.764	4,02	63
„Ковин”	На слој	20,52	1.026	2,10	71
„Колубара” класа Де	У слој	28,08	1.404	3,40	75
„Колубара” класа Бе	У слој	21,96	1.098	5,33	76
„Ковин”	У слој	15,12	0.756	1,77	76

#### *Материјални биланс њејела и губици са несагорелим у њејелу*

При дозирању угљева на површину слоја, у слоју остаје знатно већа количина пепела него у режимима са дозирањем испод површине слоја, због различитог гранулометријског састава угља у ова два случаја. У режимима са дозирањем на слој, у слоју је остало 54–78% укупне количине пепела, што говори о потреби да систем за изузимање пепела из слоја има значајан капацитет. Све честице пепела веће од 1 mm остајале су у слоју, при овим брзинама флуидизације. Највише пепела остаје у слоју при сагоревању угља „Колубара” класа Де, који има највећи проценат јаловине. У пепелу који остаје у слоју проценат честица већих од 1 mm био је од 30% за угаљ „Ковин”, до 55% за угаљ „Колубара” класа Де. Пепео ове гранулације мора бити одведен из слоја, и пре враћања у слој се мора уситнити на величину <1 mm. Преостали пепео који остаје у слоју (честице <1 mm), доприноси такође повећању количине инертног материјала у слоју, али могу после просејавања бити враћене у слој.

При дозирању угља ситне гранулације испод површине слоја, у слоју остаје 26–51% од укупне количине пепела, при чему је 65–80% честица мањих од 0,8 mm. Честица већих од 1 mm, које би захтевале уситњавање пре повратка у слој има 20–35%.

Губици услед несагорелог угљеника у летећем пепелу су незнатни, 0,22–2,1%, од укупне енергије унесене угљем. Губици услед несагорелог у летећем пепелу при сагоревању угља „Колубара” класа Де ситне гранулације, и при дозирању испод површине слоја били су нешто већи, 2,11%, због великог процента честица мањих од 1 mm у полазном угљу. У пепелу који је остао у слоју несагорелог практично нема. У реалним постројењима, због веће висине простора изнад слоја, губици услед несагорелог у летећем пепелу би били још мањи.

### Подобност испитиваних угљева за сагоревање у котловима СЦФС

Приликом дефинисања Програмског задатака било је познато да у нас не постоје експерименталне апаратуре, пилот-постројења и/или индустријски котлови са СЦФС, и да је *Методологија ИТЕ-ИБК* развијена и проверена за оцену подобности, избор концепције и конструисање котлова са СМФС. Због тога је једно од кључних питања: „Да ли је оправдано резултате добијене испитивањима у МФС применити за оцену подобности сагоревања у котловима ЦФС?”

Анализом сличности и разлика услова сагоревања и конструкције котлова СМФС и СЦФС [1– 3, 7] уверљиво је показано да је, уколико су познати процеси у ове две врсте котлова, могуће поуздано оценити подобност неког угља за сагоревање у котловима ЦФС и формулисати подлоге за избор конструкције и типа котла и упоређење са класичним технологијама сагоревања [7, 10, 11]. У табл. 8 набројане су сличности и разлике услова сагоревања и конструкције котлова МФС и ЦФС, које су пресудне за анализу резултата добијених овим испитивањима.

**Таблица 8. Сличности и разлике услова сагоревања и конструкције котлова МФС и ЦФС**

Услови	Котлови МФС	Котлови ЦФС
Концентрација честица инертног материјала у ложишту	– Велика у слоју (1000 kg/m <sup>3</sup> ) – Веома ниска изнад слоја (0,1 kg/m <sup>3</sup> ) – Нагла промена на површини слоја	– Средње висока (20–250 kg/m <sup>3</sup> ) – Континуална промена дуж ложишта – Доњем делу ложишта (bottom bed) са већом концентрацијом
Температура у ложишту	– 800–850 °С – Константна по висини и преску слоја – Изнад слоја опада	– 800–850 °С – Константна дуж висине ложишта – Константна по попречном пресеку
Мешање угља и инертног материјала	– Интензивно аксијално у слоју – Слабо радијално	– Интензивно у целом простору ложишта, и радијално и аксијално
Коефицијенти прелаза топлоте	– Високи у слоју 400–650 W/m <sup>2</sup> K – Мали изнад слоја 50 W/m <sup>2</sup> K	– Високи дуж целе висине ложишта (120–150 W/m <sup>2</sup> K)
Ефикасност сагоревања	– Висока уз рецикулацију несагорелих честица	– Висока за све типове угља и све гранулације
Ефикасност искоришћења кречњака	– Висока уз рецикулацију и са великим односом Ca/S	– Висока за све врсте кречњака и уз мали однос Ca/S
Секундарни ваздух	– Опционо, за младе угљеве и ситне гранулације	– Инхерентан, доприноси смањењу емисије NO <sub>x</sub>
Брзина гасова у ложишту	– 1–3 m/s	– 6–10 m/s
Величина инертног материјала слоја	– 1–2 mm	– 0,15–0,25 mm
Вишак ваздуха	– 1,1–1,2	– 1,1–1,2
Топлотно оптерећење попречног пресека ложишта	– 1–2 MW <sub>t</sub> /m <sup>2</sup>	– 3–6,5 MW <sub>t</sub> /m <sup>2</sup>
Попречни пресек ложишта	– Већи за исту снагу	– Мањи за исту снагу
Висина ложишта	– Мања	– 40–50 m

У котловима са мехурастим флуидизованим слојем, због оштре границе између флуидизованог слоја на дну ложишта и простора изнад слоја, дуж висине ложишта постоје велике разлике концентрације чврстих честица, температуре, коефицијената прелаза топлоте, мешање је мање интензивно посебно изнад слоја, често је потребно увођење секундарног ваздуха и рецикулације честица ради постизања високе ефикасности сагоревања и великог степена одсумпоравања. У котловима са циркулационим флуидизованим слојем концентрација честица, температура и коефицијенти прелаза топлоте су константни по висини и попречном пресеку ложишта, брзине гасова су веће и топлотно оптерећење по попречном пресеку и запремини ложишта је веће.

*Понашање испитиваних угљева при сагоревању у котловима СЦФС*

**Начин дозирања угља и оптимална гранулација горива.** Брзина сагоревања коксног остатка је већа него у котловима СМФС, па је угљеве „Колубара” свих класа, и угаљ „Ковин”, могуће, и оптимално, сагоревати у доставном стању без претходне припреме (осим дробљења до величине честица <50 mm) и доzirати на површину слоја. Због мањих попречних пресека ложишта и бољег мешања инертног материјала, могуће је користити секторске и пужне дозаторе, и гравитационо увођење угља у ложиште колта СЦФС. Само у котловима великих снага биће потребно користити разбачиваче угља.

**Понашање испитиваних угљева у системима за дозирање.** Секторским и пужним дозаторима могуће је доzirати угаљ са доставном влагом (40–50%), уз предузимање мера да не дође до лепљења угља на зидовима дозатора и бункера. У случају пнеуматског ложења и транспорта гранулација угља треба да буде око 5 mm, а влага мања од 30%.

**Сгаривање коїла.** Најповољнија температура старта (температура почетка дозирања угља) одређена експерименталним путем у мехурастом флуидизованом слоју (за колубарске лигните 420–450 С, а за угаљ „Ковин” 450 С), а примењена и у пилот-постројењу, може да се усвоји и за котлове СЦФС. Могуће је усвојити и нижу температуру старта (колубарски лигнити и ковински угаљ се пале већ на око 350 С), али би и у котловима СЦФС овај избор захтевао веома опрезан, спор и добро осмишљен поступак старта, мада су опасности од прекорачења дозвољених температура у ложишту мале. Ниске температуре страта нису препоручљиве због повећања емисије CO.

**Оптимални услови стационарног режима рада коїла СЦФС.** Препоручене температуре сагоревања у котловима СЦФС су исте као и за котлове СМФС. Зато нема разлога да препоручени опсег температура за колубарске угљеве од 750–890 С (за угаљ „Ковин” чак 950 С), не буде оптималан и за котлове СЦФС. И при нешто вишим температурама опасност од агломерације пепела и материјала слоја је мала, због интензивног мешања. Изабрана оптимална температура стационарног сагоревања у ложишту од 850 С, и у котловима СЦФС обезбедиће повољне услове за лако одржавање стационарног стања и брзу реакцију слоја на промене протока горива и ваздуха (већа је брзина сагоревања коксног остатка). На изабраној температури сагоревања, у котловима СЦФС ће се са испитиваним угљевима остварити

већа ефикасност сагоревања и већи степен одсумпоравања при истој количини кречњака, него што је измерено у експериментима. Због тога у котловима СЦФС може да се постигне мали вишак ваздуха (1,1–1,2), уз исту ефикасност сагоревања у ложишту, што омогућава постизање већег степена корисности котла.

**Ефикасност сагоревања и губици са несагорелим у пепелу у којљу СЦФС.** Котлови СЦФС у експлоатацији имају степен корисности преко 92%, а ефикасност сагоревања преко 99,9%. При сагоревању лигнита нема препрека да се остваре ови максимални степени корисности котлова СЦФС и максимална ефикасност сагоревања у ложишту. Добијена висока ефикасност сагоревања у пилот-постројењу мале висине и са мехурастим флуидизованим слојем, биће још већа за испитиване угљеве у условима сагоревања у циркулационом флуидизованом слоју. Губитак услед несагорелог у пепелу који остаје у слоју није забележен у пилот-постројењу, па не треба очекивати да ће га бити у повољнијим условима сагоревања у доњем делу ложишта СЦФС, у тзв. *bottom bed*. Губици са несагорелим честицама у летећем пепелу, који су у пилот-постројењу били око 0,5%, биће у котловима СЦФС далеко мањи због бољих услова сагоревања, велике висине ложишта и вишеструке рецикулације чврстих честица. Губитак са несагорелим може да се очекује само у честицама пепела мањим од 40  $\mu\text{m}$  којих је било при дозирању на слој 7–10% за колубарски лигнит, 17% за угаљ „Ковин”, а при дозирању испод површине слоја 15–20% за колубарске угљеве, 25% за угаљ „Ковин”, рачунато од укупне количине пепела. Може да се процени да губици са несагорелим честицама могу бити највише 0,1–0,15%. Бољи су и услови за сагоревање испарљивих материја.

**Систем за рецикулацију летећег пепела у којљу СЦФС.** Честице мање од 40  $\mu\text{m}$  које ће са гасовитим продуктима сагоревања пролазити кроз конвективни део котла СЦФС и бити задржане било у врећастим филтрима било у електрофилтрима, није потребно враћати на догоревање у ложиште због веома малог садржаја несагорелог угљеника.

**Попречни пресек и висина ложишта котла СЦФС.** Снага котла и избор брзине флуидизације дефинишу попречни пресек ложишта. Висина ложишта котлова СЦФС зависи од потребне висине да честице мање од 40  $\mu\text{m}$  имају времена да сагоре до изласка из ложишта и површине потребне за размену топлоте у ложишту.

Имајући у виду велику реактивност испитиваних лигнита (и колубарског и ковинског), измерен мали проценат несагорелог у честицама летећег пепела, боље услове сагоревања у СЦФС и већу брзину сагоревања у тим условима, може се са сигурношћу тврдити да ће висина ложишта котлова СЦФС за испитиване угљеве бити одређена потребним размењивачким површинама, а не временом боравка честица мањих од 40  $\mu\text{m}$  до потпуног сагоревања.

Због мале топлотне моћи испитиваних угљева, односно мале адијабатске температуре сагоревања, у ложишту неће бити потребно поставити велике размењивачке површине, тако да ће котлови СЦФС бити мале висине (вероватно мање од 30 m), неће бити неопходни спољни измењивачи топлоте у повратној спусној грани котла, пре поновног повраћаја инертног материјала у ложиште.

**Расподела генерације пепела у ложишту у којљу СЦФС.** Генерација топлоте у ложишту котла са циркулационим флуидизованим слојем је равномерна,

због равномерног распореда честица угља по висини ложишта, значајне концентрације честица инертног материјала по целој висини ложишта и интензивног мешања. Зато податак који је добијен у пилот-постројењу са мехурастим флуидизованим слојем (90–95% ослобођене топлоте у слоју) није много битан за избор концепције и конструкцију котла.

С обзиром да је у пилот-постројењу добијена средња генерација топлоте по попречном пресеку ложишта од око  $0,6 \text{ MW}_t/\text{m}^2$ , може се очекивати у котлу СЦФС, због 5–6 пута већих брзина флуидизације, топлотно оптерећење око  $3\text{--}4 \text{ MW}_t/\text{m}^2$ .

**Расподела њејела на њејео који осџаје у слоју и леџећи њејео у коџлу СЦФС.** Експериментима у пилот-постројењу установљено је да при сагоревању испитиваних угљева при дозирању на слој, у слоју остаје 54–78% пепела, а при дозирању испод површине слоја (угаљ ситне гранулације, до 2 mm) 26–51%. Већи проценат је за угаљ са већим процентом пепела, тј. највећи за угаљ „Колубара” класе Де. Због велике количине пепела који остаје у слоју систем за одвођење пепела из слоја биће великог капацитета, а биће потребан и хладњак за искоришћење топлоте инертног материјала који се одводи.

Посебну пажњу треба посветити конструкцији дистрибуционе решетке и броју и распореду отвора за изузимање вишка инертног материјала из слоја. Систем за просејавање пепела из слоја и систем за повраћај неопходне количине натраг у ложиште, мораће да одваја честице мање од 0,2 mm, да би почетни инертни материјал слоја – песак, био замењен пепелом угља који се сагорева.

Летећи пепео који одлази из ложишта са гасовитим продуктима сагоревања и пролази кроз конвективни део котла биће гранулације мање од 40  $\mu\text{m}$ , те ће бити неопходни врећасти филтри или електростатички филтри да би се задовољиле норме емисије честица.

#### *Емисија $\text{CO}$ , $\text{NO}_x$ , $\text{SO}_2$ и честица у коџлу СЦФС*

**Емисија  $\text{CO}$ .** Реално је очекивати да при сагоревању испитиваних лигнита неће бити проблема да се постигну и мање вредности емисије  $\text{CO}$  него у пилот-постројењу и задовоље европске норме о емисији  $\text{CO}$  које се крећу од 50–100 ppm, при 7%  $\text{O}_2$ , односно домаће норме.

**Емисија  $\text{NO}_x$ .** Анализом измерених концентрација  $\text{NO}_x$  и прерачунатих на референтну концентрацију кисеоника од 7%, закључено је да при сагоревању лигнита „Колубара” и „Ковин” у котловима са флуидизованим слојем не треба очекивати емисије веће од 150 ppm, те неће бити проблема да се задовоље европске и домаће норме.

**Емисија  $\text{SO}_2$ .** Ефикасност одсумпоравања у котловима СЦФС и степен искоришћења кречњака биће много већи него што је одређен експериментима у пилот-постројењу. Такође, може се очекивати да и самоодсумпоравање буде веће од 40–60% колико је одређено у лабораторијском ложишту. При сагоревању испитиваних угљева у котловима СЦФС оствариће се емисије мање од дозвољених.

**Емисија честица.** Конвективни део котла СЦФС биће оптерећен само честицама мањим од 40  $\mu\text{m}$ . Врећасти или електрофилтри могу да обезбеде емисије мање од европских норми ( $<10 \text{ mg}/\text{m}^3$ ).



Остали параметри режима рада и конструкције котла, који нису одређени овим испитивањем усвајају се према вредностима усвојеним у котловима у експлоатацији [1, 12–14]: средњи пречник инертног материјала (око 0,2 mm), брзина флуидизације (6–10 m/s), распоред измењивачких површина у ложишту (ложиште већим делом озидано, без спољњег измењивача са флуидизованим слојем), степен рециркулације (4–10), број циклона у примарном кругу (један циклон на 50 MW<sub>e</sub> снаге котла), димензије и конструкција повратне гране и струјног вентила.

### Закључак

Испитивање сагоревања угљева „Колубара” класе А, Бе, Це и Де и угља „Ковин” у флуидизованом слоју, је показало да:

- методологија ИТЕ-ИБК даје поуздане резултате о понашању угљева у котловима СЦФС,
- су колубарски лигнити и лигнит „Ковин” погодни за сагоревање у котловима СЦФС; боље и ефикасније ће сагоревати него у котловима СМФС,
- важи закључак претходних вишегодишњих истраживања: „да су лигнити веома погодни за сагоревање у флуидизованом слоју” [4–6],
- котлови СЦФС могу ефикасно и еколошки прихватљиво сагоревати подински угаљ са високим садржајем јаловине и угљеве сличних карактеристика, тј. да у котловима СЦФС могу сагоревати угљеви тзв. ванбилансних резерви, и
- добијени подаци омогућају да се оцени које су концепције и конструкције котлова СЦФС најповољније за колубарске лигните и угаљ „Ковин”.

Котлови СЦФС за сагоревање испитиваних угљева имају следеће особине:

- могу користити угаљ без претходне припреме, у равном стању, гранулације до 50 mm, влажности до 45%, и уделом пепела до 45%,
- дозирање је могуће пужним и секторским дозаторима, или класичним разбацивачима за котлове веће снаге,
- препоручена температура старта 450 °C,
- стартно гориво гас или течно гориво зависно од расположивости,
- оптимална температура сагоревања 850 °C,
- омогући опсег промене радне температуре у ложишту 750–890 °C,
- ефикасност сагоревања >99,9%,
- ефикасност одсумпоравања >90%,
- потребна количина кречњака <5% од протока горива, Ca/S 2–3,
- у слоју остаје 55–78% пепела, те је потребан систем за изузимање материјала из слоја већег капацитета са хлађењем пепела,
- емисија CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> и честица је испод европских норми (честице <10 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> <100 ppm, SO<sub>2</sub> <200 ppm),
- висина ложишта мала, око 30 m, и одређена потребним размењивачким површинама,
- није неопходан спољни измењивач топлоте, и

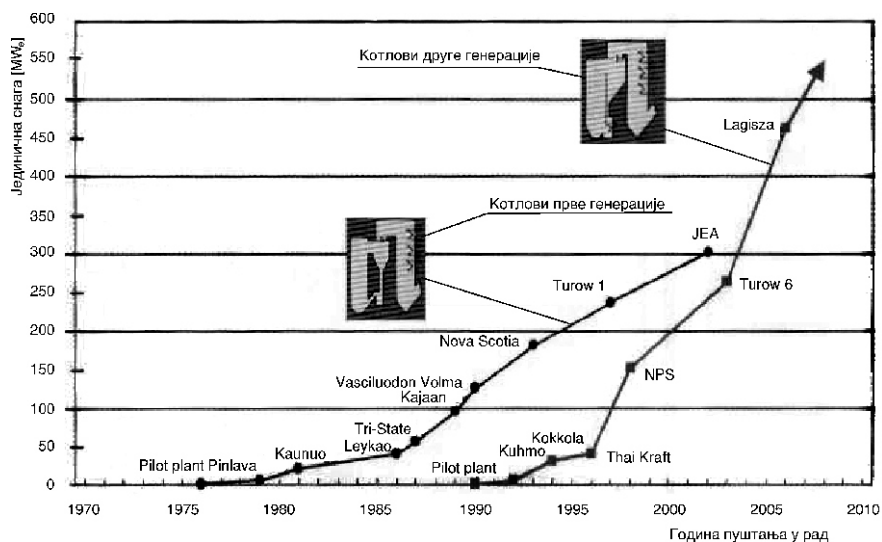
- за сепарацију честица из димних гасова потребни врећасти филтри или електрофилтри.

Резултати Студије показују да је могуће градити савремене, ефикасне и еколошки прихватљиве котлове СЦФС за производњу електричне енергије у ТЕ ЕПС (средњих и великих снага [15, 16]), и за производњу топлотне и електричне енергије у индустрији и у системима даљинског грејања (котлове СМФС у опсегу малих и средњих снага [6, 17]), који ће сагоревати угљеве који се у котловима других типова не могу сагоревати, или се не може остварити висока ефикасност сагоревања и задовољити обавезне еколошке норме.

Применом котлова СМФС и СЦФС електропривреде Пољске, Чешке и Словачке извршиле су ревитализацију електрана и топлана [18, 19], повећале ефикасност сагоревања и степена корисности, флексибилност у погледу квалитета горива и довели емисију у оквиру европских норми.

Добијени подаци омогућују анализу понуда страних испоручилаца котлова СЦФС, при изради студија оправданости примене котлова СЦФС у ЕПС и равноправан третман ове технологије при упоређивању са класичном котловском технологијом у припреми документације за ревитализацију старих и изградњу нових котлова ТЕ ЕПС. Нема техничких препрека да се котлови СЦФС примене у процесу ревитализације старих блокова ТЕ ЕПС, јер су у свету у погону котлови СЦФС јединичне снаге преко 300 MW<sub>e</sub>. Котлове СЦФС могуће је примењивати и за градњу нових већих блокова у ТЕ ЕПС, јер су у градњи у свету блокови снаге преко 450 MW<sub>e</sub>. Подаци фирме *Forster Wheeler* показују да су јединичне снаге котлова СЦФС достигле ниво уобичајен у производњи електричне енергије (сл. 4) [20, 21].

Имајући у виду резултате испитивања у овој студији, и закључке који су на основу тога изведени може се констатовати да технологија сагоревања у флуидизованом слоју може да буде значајан чинилац у решавању многих проблема енер-



Слика 4. Пораст јединичне снаге котлова СЦФС фирме *Foster Wheeler*

гетике Србије, и оптимално средство за испуњавање садашњих и будућих обавеза државе у погледу заштите околине [22, 23].

## Литература

- [1] Ока, С., Грубор, Б., Дакић, Д., Илић, М., Мановић, В., Ерић, М., Паприка, М., Ока, Н., Белошевић, С., Баришић, В., Младеновић, М., Црномарковић, Н., Живојиновић, Р., Лазић, М., Бабовић, М., Милошевић, Ј., Ненић, Д., Вукојчић, П., Истраживање могућности примене сагоревања у циркулационом флуидизованом слоју (ЦФС) у котловима у Електропривреди Србије, I део, Тачке Програмског задатка 1, 2, 3 и 4, Институт за нуклеарне науке „Винча”, Лабораторија за термотехнику и енергетику, Интерни елаборат, 2004.
- [2] Ока, С., Грубор, Б., Дакић, Д., Илић, М., Мановић, В., Ерић, М., Паприка, М., Ока, Н., Белошевић, С., Баришић, В., Младеновић, М., Црномарковић, Н., Истраживање могућности примене сагоревања у циркулационом флуидизованом слоју (ЦФС) у котловима у Електропривреди Србије, II део, Тачке Програмског задатка 5 и 6, Институт за нуклеарне науке „Винча”, Лабораторија за термотехнику и енергетику, Интерни елаборат, 2004.
- [3] Ока, С., Грубор, Б., Дакић, Д., Илић, М., Мановић, В., Ерић, М., Паприка, М., Ока, Н., Белошевић, С., Баришић, В., Младеновић, М., Црномарковић, Н., Истраживање могућности примене сагоревања у циркулационом флуидизованом слоју (ЦФС) у котловима у Електропривреди Србије, III део, Прилози, Институт за нуклеарне науке „Винча”, Лабораторија за термотехнику и енергетику, Интерни елаборат, 2004.
- [4] Ока, С., Grubor, B., Arsić, B., Dakić, D., The Methodology for the Investigation of Fuel Suitability for FBC and Results of Comparative Study of Different Coals, in: Fluidized Bed Combustion in Practice: Clean, Versatile, Economic, Institute of Energy, London, 1988, I/8/1-19
- [5] Ока, С., Fuel Testing and Influence of Coal Characteristics on Bubbling FBC Boiler Design, 1<sup>st</sup> South-East European Symposium on Fluidized Beds on Energy Production, Chemical and Process Engineering and Ecology, September 24-27, 1997, Ohrid, Republic of Macedonia, Vol. 2, 223-242
- [6] Ока, С., Fluidized Bed Combustion (Ed. E. J. Anthony), Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, 2003
- [7] Ока, С., How to Use Data about Coal Combustion in Bubbling Fluidized Beds for Design of the Circulating Fluidized Bed Boilers?, Presented at 41<sup>st</sup> IEA FBC Technical Meeting, Salerno, Italia, October 30, 2000, 1-9
- [8] Живојиновић, Р., Лазић, М., Бабовић, М., Милошевић, Ј., Ненић, Д., Вукојчић, П., Одређивање репрезентативног блока угља за испитивање, Истраживање могућности примене сагоревања у циркулационом флуидизованом слоју (ЦФС) у котловима у Електропривреди Србије, I део, Тачка 3 Програмског задатка, Институт за нуклеарне науке „Винча”, Лабораторија за термотехнику и енергетику, Интерни елаборат, 2004.
- [9] Ока, С., Илић, М., Determination of Start-Up Temperature for FBC Boilers and Furnaces, *Proceedings*, 2<sup>nd</sup> Symposium of South-East European Countries on Fluidized Beds in Energy Production, Chemical and Process Engineering and Ecology, September 21-25, 1999, Arandjelovac, Yugoslavia, 151-164
- [10] Basu, P., Duta, A., Miller, L., An Intelligent Tool for Evaluating Bids for Circulating Fluidized Bed Boilers, 17<sup>th</sup> International Conference on FBC, *Proceedings on CD*, FBC2003-153, 2003, 1-4
- [11] Lafanechere, L., Basu, P., Jestin, L., Effects of Steam Parameters on the Size and Configuration of Circulating Fluidized Bed Boilers, *Proceedings*, 13<sup>th</sup> International Conference on FBC, Orlando, FL, USA, May 7-10, 1995, Vol. 1, 1-7
- [12] Goidich, S. J., Hyppanen, T., Foster Wheeler Compact CFB Boilers for Utility Scale, 16<sup>th</sup> International Conference on FBC, *Proceedings on CD*, Reno, NV, USA, May 13-16, 2001, FBC01-099, 1-11
- [13] Belin, F., Maryamechik, M., Walker, D. J., Wietzke, D. L., Babcock&Wilox CFB Boilers-Design and Experience, 16<sup>th</sup> International Conference on FBC, *Proceedings on CD*, Reno, NV, USA, May 13-16, 2001, FBC01-0091, 1-9
- [14] Bursi, J. M., Lafanechere, L., Jastin, L., Basic Design Studies for a 600 MW<sub>e</sub> CFB Boiler, 15<sup>th</sup> International Conference on FBC, *Proceedings on CD*, 1999, FBC99-0045, 1-20
- [15] Ока, С., Pavlović, N., Application of ACFBC Technology in EPS, *Proceedings*, Symposium ZEMAK, Ohrid, Republic of Macedonia, October 7-11, 1997, Book 2, 687-697
- [16] Mesarović, M., Ока, С., Pavlović, N., Economic and Environmental Features of Fluidized Bed Combustion Technology for Power Generation in Yugoslavia, Introductory lecture, *Proceedings*, 2<sup>nd</sup> Symposium of South-East European Countries on Fluidized Beds in Energy Production, Chemical and Process Engineering and Ecology, Workshop: Prospects and Experience of Utility CFB Boilers, September 21-25, 1999, Arandjelovac, Yugoslavia, 455-474

- [17] Oka, S., Anthony, E. J., Future of Bubbling FBC Technology, *Proceedings*, 4<sup>th</sup> International Heat Transfer Forum, Minsk, Belarus, May 24-28, 2004
- [18] Makansi, J., CFB Boilers Keep Older Coal-Fired Units Viable, New Ones Competitive, *Electric Power International*, September, 1995, 85-90
- [19] Makansi, J., FBC Retrofit Leads Komorany, Czech Republic into New Era, *Electric Power International*, March, 1994, 49-54
- [20] Wang, S. I., Tsao, T. R., Gagliardi, C. R., Herb, B. E., Cox, J., Parham, D., Technical Challenges in the Scale-up and Design of a 250 MW ACFB for the York County Energy Partners Project, *Proceedings*, 12<sup>th</sup> International Conference on FBC, San Diego, CA, USA, May 9-13, 1993, Vol. 1, 1-8
- [21] Darling, S. L., Li, X., Design of a 350 MWe CFB Boiler, *Proceedings*, 14<sup>th</sup> International Conference on FBC, Vancouver, Canada, May 11-14, 1997, Vol. 1, 205-212
- [22] Ока, С., Месаровић, М., Енергетика – електропривреда и производња угља – Текуће стање, развојни потенцијали, стратегија развоја до 2010. године, очекивани ефекти и потребне институције, владине политике и мере, у: Стратегија привредног развоја Србије до 2010, Издање МНТР Владе Републике Србије, Београд, 2002, Књига II, 251-266
- [23] Ока, С., Месаровић, М., Гагић, Д., Блечић, Н., Коришћење угља из малих рудника за производњу енергије, у: Изабрани Развојни Програми – Стратегија привредног развоја Србије до 2010, МНТР Владе Републике Србије, Београд, 2002, Књига II, 505-520

## Abstract

# Investigation of the Suitability of Serbian Lignite Kolubara and Kovin for Burning in CFBC Boilers

by

*Simeon OKA<sup>1</sup>, Borislav GRUBOR<sup>1</sup>, Dragoljub DAKIĆ<sup>1</sup>, Mladen ILIĆ<sup>1</sup>, Vasilije MANOVIĆ<sup>2</sup>, Milić ERIĆ<sup>1</sup>, Milijana PAPIKA<sup>1</sup>, Nikola OKA<sup>1</sup>, Srdjan BELOŠEVIĆ<sup>1</sup>, Rastko MLADENOVIĆ<sup>1</sup>, and Nenad CRNOMARKOVIĆ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> VINČA Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia and Montenegro

<sup>2</sup> Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Belgrade, Serbia and Montenegro

The results of exhaustive investigations of behavior of lignites Kolubara and Kovin during combustion in fluidized bed are presented in the paper. Investigation was carried out due to the interest of Serbian Electric Power Production Company to use CFBC boilers in the process of refurbishment of old pulverized coal combustion boilers. As a part of feasibility study for use of CFBC boilers in power plants in Serbia, investigation of combustion characteristics of lignites was performed using original methodology introduced many years ago by Laboratory for thermal engineering and energy. Methodology was approved during long period by investigation of more than 20 domestic coals for FBC combustion, with the aim to determine design data for bubbling FBC boilers and hot gas generators.

Special attention was paid to analyze similarities and differences of the BFBC and CFBC and to approve that methodology developed for bubbling fluidized bed combustion conditions can be used also to analyze coal suitability for combustion in circulating fluidized bed boilers.

Four qualities of Kolubara lignite, with different heat capacity from 2.5 to 8.5 MJ/kg, and different ash contents were investigated, and also lignite Kovin in the same range of heat capacity. Investigations were performed in three phases: (1) ultimate and proximate analysis, determination of ash sintering temperature by standard method and in fluidized bed laboratory oven, (2) investigations in laboratory fluidized bed furnace and determination of coal particle fragmentation, burning rate and start-up temperature, selfsulphure capture, and (3) investigation of combustion in pilot-plant in stationary combustion conditions.

It is approved that methodology used is suitable for coal suitability analysis for combustion in CFBC boilers. The results obtained have shown that lignites investigated can be efficiently burned in CFBC boilers, even more efficiently than in BFBC boilers. The results on combustion behavior of lignites presents good data base for feasibility study of the CFBC boiler use in Serbian power plants, choice of the type and design of CFBC boilers.

Key words: *combustion, lignites, fluidized bed combustions technology, coal testing, coal behavior*

Одговорни аутор / Corresponding author (S. Oka)  
E-mail: okasn@afrodita.rcub.bg.ac.yu