

**Драгослава Стојиљковић¹, Александар Јововић¹, Владимир Јовановић¹,
Небојша Манић¹, Ђорђина Миловановић², Сања Пејровић²,
Лин Рубов³, Михајло Гаврић⁴, Зринка Жбогар⁴**

¹ Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

² Енергопројект – ЕНТЕЛ, Београд, Србија

³ Корпорација „Worley Parsons”, Софија, Бугарска

⁴ ЈП Електропривреда Србије, Београд, Србија

Избор оптималног техничког решења постројења за одсумпоравање димних гасова на ТЕ „Костолац Б”

Стручни рад

UDC: 622.992.84:620.92

У складу са својим одређењем да рад својих термоенергетских објеката усклади са захтевима регулативе Европске Уније која се односи на заштити животне средине, Електропривреда Србије је заочела процес пројектовања постројења за смањење емисија сумпорних оксида. Према закључцима Студије „Правици оптималног смањења емисије сумпорних оксида из термоелектрана Електропривреде Србије”, ТЕ „Костолац Б” је изабрана као прва термоелектрана на којој је планирана изградња оваквог постројења. У току је израда пројектне документације за добијање дозволе за изградњу постројења за одсумпоравање димног гаса (ОДГ) и израду шендерске документације за избор консултаната за реализацију пројекта до пуштања постројења у погон. На основу прелиминарних прихваћених анализа као референтни постројај одсумпоравања дефинисан је влажни кречњак/згус постројај.

Имајући у виду да предвиђено постројење за одсумпоравање с једне стране представља посебан систем у оквиру ТЕ, а с друге и део електране као целине, пројектовање овог постројења мора узети у обзир све захтеве који се односе на уклањање овог постројења у постојеће процесе ТЕ, како би се обезбедио њен несметани погон у наредном периоду.

У овом раду приказани су: (1) основни захтеви који представљају улазне параметре за пројектовање постројења за одсумпоравање, који се односе на захтевани квалитет сорбента и воде, карактеристике димних гасова и захтевани ниво одсумпоравања димних гасова; (2) основне карактеристике главних система постројења за ОДГ; (3) могуће опције техничких решења постројења са аспекта уклањања у расположиви простор и постојеће системе ТЕ и (4) предлог оптималног решења постројења за ОДГ са аспекта функционалности и поузданости рада постројења, инвестиционих улагања и погонских трошкова.

Кључне речи: одсумпоравање, димни гас, термоелектране

УВОД

Хармонизација регулативе Републике Србије са регулативом Европске Уније (ЕУ) започела је усвајањем закона из области заштите животне средине. Један

од најважнијих сегмената овог процеса односи се на мере заштите квалитета ваздуха путем смањења емисија штетних материја на самим изворима загађења. Имајући у виду да убедљиво највећи допринос укупним емисијама дају управо термоелектране, очекује се да ће први захтеви ЕУ у разматраној области бити усмерени на објекте Електропривреде Србије (ЕПС), при чему ће у будућем периоду приоритет бити дат активностима на смањењу емисија сумпорних оксида (SO_x) из постојећих термоелектрана.

У циљу сагледавања могућих решења одсумпоравања димног гаса у термоелектранама ЕПС-а урађена је студија [1], којом су предложена техничка решења смањења емисија SO_x из постојећих термоелектрана и дат прелиминарни предлог редоследа увођења одсумпоравања по електранама, као и динамика реализације и неопходна инвестициона средства. На основу извршеног прегледа, као оптималан поступак је одабран влажан поступак одсумпоравања димног гаса (ОДГ), са коришћењем кречњака за потребе апсорпције SO_2 , при чему се као финални нус-производ процеса апсорпције добија гипс комерцијалног квалитета. Истовремено, према критеријуму минималних улагања у односу на остварено смањење емисије сумпорних оксида, ТЕ „Костолац Б” је изабрана као прва термоелектрана на којој је планирана изградња оваквог постројења. На основу закључака студије, Електропривреда Србије је донела одлуку о изради:

- Студије о могућностима снабдевања кречњаком за потребе одсумпоравања димног гаса ТЕ „Костолац Б”, ТЕ „Никола Тесла А” и ТЕ „Никола Тесла Б” и новог термо капацитета на колубарски лигнит приближне снаге 700 MW;
- Претходне студије оправданости са генералним пројектом одсумпоравања димног гаса ТЕ „Костолац Б”;
- Студије оправданости са идејним пројектом одсумпоравања димног гаса ТЕ „Костолац Б”;
- Студије о процени утицаја на животну средину увођења постројења за одсумпоравање димног гаса ТЕ „Костолац Б”.

Израда наведених студија била је поверена конзорцијуму који су сачињавали Машински факултет Универзитета у Београду, Worley Parsons, Енергопројект – Ентел и Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду.

У овом раду приказана су разматрања обухваћена претходном студијом оправданости са генералним пројектом одсумпоравања димног гаса ТЕ „Костолац Б” (ПСО-ГП ТЕКБ) [2], са циљем да се изабере оптимално техничко решење постројења за ОДГ у ТЕ „Костолац Б”. Основни циљ уградње ОДГ постројења у ТЕ „Костолац Б” је смањење емисије SO_2 тако да се постигну излазне концентрације SO_2 ниже од 400 mg/m^3 (6% O_2 , сув гас, нормални услови), при пуном оптерећењу блока и при сагоревању угља најлошијег очекиваног квалитета.

Имајући у виду да предвиђено постројење за одсумпоравање, с једне стране представља посебан систем у оквиру термоелектране, а с друге и део електране као целине, пројектовање овог постројења мора узети у обзир све захтеве који се односе на уклапање овог постројења у постојеће процесе термоелектране, како би се обезбедио њен несметани рад у наредном периоду.

У раду су приказани:

- (1) основни захтеви који представљају улазне параметре за пројектовање постројења за одсумпоравање, који се односе на захтевани квалитет сорбента и воде, карактеристике угља, карактеристике димног гаса и захтевани ниво одсумпоравања димног гаса;
- (2) основне карактеристике главних система постројења за ОДГ;
- (3) могуће опције техничких решења постројења са аспекта уклапања у расположиви простор и постојеће системе термоелектране, и
- (4) предлог оптималног решења постројења за ОДГ са аспекта функционалности и поузданости рада постројења, инвестиционих улагања и погонских трошкова.

ОПИС ИЗАБРАНОГ ПОСТУПКА ОДСУМПОВАЊА ДИМНИХ ГАСОВА

Влажни поступак ОДГ тренутно се сматра најефикаснијим и у свету се највише користи у термоенергетским објектима. Овај поступак заснива се на распршивању суспензије креча или кречњака у димни гас, с циљем конверзије SO_2 у потенцијално комерцијалан крајњи производ. Принцип рада је једноставан: након што је летећи пепео у највећој мери одстрањен из димног гаса у електрофилтерском постројењу, сорбент, који углавном представља суспензију кречњака (калцијум карбоната, CaCO_3), се распршује у димни гас. Сорбент реагује са SO_2 у струји гаса формирајући нуспроизвод који је сулфитног или сулфатног карактера. Калцијум сулфит или сулфат се из поменутог продукта таложи, док се већина воде рециклира. У зависности од врсте оксидације која је примењена у поступку одсумпоравања процес ће резултирати добијањем сулфитног или сулфатног нуспроизвода. У влажном поступку одсумпоравања са природном оксидацијом користи се искључиво кисеоник расположив из димног гаса који се третира, тако да се добија производ који се углавном састоји од калцијум сулфита (CaSO_3). За разлику од описаног, у влажном поступку одсумпоравања са принудном оксидацијом користе се вентилатори којима се доводи додатна количина кисеоника у цео процес, тако да је добијени производ калцијум сулфат дихидрат ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) тј. гипс. У све већем броју постројења примењује се принудна оксидација, првенствено због тога што нуспроизвод са већом количином калцијум сулфита, који се јавља као последица природне оксидације, има мању комерцијалну вредност, али и зато што су постројења са принудном оксидацијом поузданија и захтевају одржавање мањег обима у поређењу са системима са примењеном природном оксидацијом.

УЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПОСТРОЈЕЊА ЗА ОДСУМПОВАЊЕ ДИМНИХ ГАСОВА

Опис термоелектране

Термоелектрана „Костолац Б” састоји се од два блока, Б1 и Б2, инсталисаног капацитета 2 348,5 MW. Блокови су пуштени у рад 1988. и 1991. године, респективно.

Термоелектрана се снабдева угљем из површинског копа Дрмно, који се налази 1 km источно од електране. Испоручени угаљ је лигнит мале топлотне моћи, релативно високог садржаја влаге и пепела и са садржајем укупног сумпора од око 1,3%. Основне пројектне карактеристике котловског постројења ТЕ „Костолац Б” приказане су у табл. 1.

Таблица 1. Основне пројектне карактеристике котловског постројења ТЕ „Костолац Б”*

Параметар	Јединица	Опис
Испоручилац опреме		SES Пмаће (конструкција Sulzer-Wintertur); систем за ложење угља МИНЕЛ, Београд
Тип котла		Једноцевни
Број котлова		2
Инсталисана снага, по блоку	MW	348,5
Ефективна снага, по блоку	MW	330
Пројектно гориво		Лигнит
Пројектна доња топлотна моћ угља (H_d): – за катао – за млинове	kJ/kg	7.315 6.061
Максимална трајна продукција паре	t/h	1.000
Притисак на изласку из прегрејача паре	bar	186
Притисак на изласку из догрејача паре	bar	43,7
Температура на изласку из прегрејача паре	°C	540
Температура на изласку из догрејача паре	°C	540
Тип промајног система		Билансни
Температура ваздуха на уисној страни вентилатора	°C	20
Проток димног гаса на улазу у загрејач ваздуха	m_N^3/h	2.015.100
Проток димног гаса на излазу из загрејача ваздуха	m_N^3/h	2.015.100
Потрошња горива	t/годишње	1.650.000
Температура димног гаса на изласку из ложишта	°C	150
Степен корисности котла	%	87,8

Извор података: [1]

* карактеристике гарантног угља су: $H_d = 7325$ kJ/kg, садржај пепела 22,5% и садржај влаге 43,83%

Термоелектрана се снабдева расхладном водом из реке Дунав, каналом кроз који се вода усмерава ка пумпној станици.

ТЕ „Костолац Б” је опремљена електрофилтарским постројењима за контролу емисије честица. Димни гасови из сваког од блокова термоелектране пролазе

кроз два паралелна електрофилтерска постројења. Испитивања реалног стања рада електрофилтерских постројења показала су да се концентрације честица у димном гасу блока Б2 иза електрофилтера крећу око 200 mg/m^3 (на основу података континуалних мерења обављаних након реконструкције котла блока Б2), али са повременим прекорачењима чак и до 700 mg/m^3 , док се за блок Б1 крећу у опсегу $150\text{--}250 \text{ mg/m}^3$. Измерена температура димног гаса износи око $170 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

Првобитним пројектом термоелектране нису предвиђене мере смањења емисија сумпорних оксида. Из тог разлога емисије сумпор диоксида у димним гасовима разматране термоелектране вишеструко премашују максимално дозвољене вредности дефинисане како у домаћој, тако и у регулативи ЕУ. Измерене вредности концентрације SO_2 у димном гасу крећу се у опсегу $5000\text{--}7000 \text{ mg/m}_N^3$, са специфичним емисијама од 30 kg/MWh [3].

Димни гасови се у атмосферу испуштају кроз димњак који је заједнички за оба блока. Димњак је зидани, са унутрашње стране обложен киселоотпорном опеком, висине 250 m и излазним пречником од $9,8 \text{ m}$.

Анализа карактеристика угља који ће се користити у наредном периоду

Карактеристике угља представљају основни улазни податак за прорачун параметара струје димног гаса, а самим тим и ОДГ постројења, при чему се под карактеристикама угља подразумевају техничка и елементарна анализа угља, као и степен емисије сумпора, односно део укупног сумпора који се у виду SO_2 емитује у атмосферу са димним гасом.

Како у периоду до почетка израде ПСО-ГП ТЕКБ нису биле завршене комплетне анализе угља који ће се користити у периоду до краја радног века термоелектране, договорено је са инвеститором да се за ову фазу пројекта референтне карактеристике угља дефинишу на основу расположивих подлога (досада коришћених) о карактеристикама угља, као и оних које се односе на наредни период.

На основу података о основним карактеристикама угља за наредни период, као и расположивих комплетних анализа угља који је коришћен у претходном периоду, извршена је процена параметара квалитета референтног угља (параметри елементарне анализе) који ће се користити за даље прорачуне ОДГ постројења на нивоу Генералног пројекта. Ови параметри су приказани у табл. 2.

Карактеристике димног гаса

Очекиване карактеристике димног гаса на улазу у ОДГ постројење израчунате су на основу претходно приказаног квалитета референтног угља и усвојених параметара сагоревања, као што су:

- температура димног гаса од $170 \text{ }^\circ\text{C}$,
- коефицијент вишка ваздуха од $\lambda = 1,6$, који одговара садржају O_2 у димном гасу од 8% , и
- степен емисије сумпора од $0,9$.

Таблица 2. Референтни квалитет угља за будући период рада ТЕ „Костолац Б”

Параметар угља	Угаљ лошијег квалитета	Угаљ средњег квалитета
Доња топлотна моћ, H_d [kJ/kg]	6285	7648
Пепео	27,97	23,66
Влага	40,2	40,33
Укупни сумпор	1,08	1,13
Угљеник	19,3	22,1
Кисеоник	8,4	8,9
Водоник	1,9	2,1
Азот	0,8	0,8

Извор података: [4–6]

Остали пројектни услови

При пројектовању постројења за ОДГ усвојени су следећи пројектни услови:

- пројектовани рад постројења,
- степен одсумпоравања димног гаса,
- емисија честица,
- емисија NO_x ,
- пројектне карактеристике кречњака,
- пројектни квалитет напојне воде,
- манипулација добијеним нуспродуктом, и
- захтеви заштите животне средине – заштита ваздуха, заштита вода и бука.

Пројектовани рад постројења

Систем за ОДГ пројектован је за рад при максималном трајном оптерећењу блокова и 8760 сати рада годишње. Како је постројење предвиђено за рад без обилазног (by-pass) канала димног гаса, сви системи морају бити пројектовани за рад у свим режимима рада котла (стартовање, заустављање, вршно оптерећење, континуално оптерећење итд.). Пројектовани систем за ОДГ биће у могућности да несметано ради за неограничен број стартова и гашења котла током године.

Степен одсумпоравања димног гаса

Граничне вредности емисија SO_2 , NO_x и честица за постојећа постројења дефинисане регулативом ЕУ – Директива 2001/80/ЕС наведене су у табл. 3 и 4.

Концентрација SO_2 у димном гасу на излазу из постројења за ОДГ у ТЕ „Костолац Б” мора да се смањи на 400 mg/m^3 (нормални услови, 6% O_2 , сув гас) или ниже.

Таблица 3. Граничне вредности емисија SO₂ за постојећа постројења на чврсто гориво, у складу са регулативом Европске Уније*

Врста горива	50–100 MW _t	100–500 MW _t	>500 MW _t
Чврсто	2000	2000 до 400 (линеарна зависност)	400

* У случајевима када ове дефинисане граничне вредности емисија не могу бити постигнуте услед карактеристика коришћеног горива, код постројења чија је снага мања или једнака 100 MW_t мора да се оствари степен одсумпоравања од најмање 60%, код постројења снаге веће од 100 MW_t и мање или једнаке 300 MW_t од 75% и 90% код постројења снаге веће од 300 MW_t. За случај постројења чија је снага већа од 500 MW_t минимални степен одсумпоравања мора да износи 94%

Извор података: [4]

Таблица 4. Граничне вредности емисија честица за постојећа постројења на чврсто гориво, у складу са регулативом Европске Уније

Врста горива	Термичка снага [MW _t]	Гранична вредност емисије честица (mg/m _N ³ , 6% O ₂ , сув гас)
Чврсто	500	50
	<500	100

Извор података: [4]

Емисија честица

С обзиром на приказано реално стање рада електрофилтера и у складу са програмом усклађивања емисија честица са регулативом ЕУ за постојеће термоелектране, који је у току, у оквиру ревитализације котловског постројења блокова Б1 и Б2 ТЕ „Костолац Б” биће извршена и реконструкција постојећих електрофилтера како би излазне концентрације честица свеле на вредност од 50 mg/m³. Овај пројекат ће се реализовати независно од пројекта изградње постројења за одсумпоравање тако да је учинак који се захтева од ОДГ постројења у погледу смањења емисија честица дефинисан нултим доприносом улазној концентрацији.

Емисија NO_x

Постројење за ОДГ не доприноси смањењу емисија NO_x.

Пројектне карактеристике кречњака

Пројектне карактеристике кречњака приказане су у табл. 5. на основу посебне студије (Студије о могућностима снабдевања кречњаком за потребе одсумпоравања димног гаса ТЕ „Костолац Б”, ТЕ „Никола Тесла А” и ТЕ „Никола Тесла Б” и новог термо капацитета на колубарски лигнит приближне снаге 700 MW) у којој је анализирана могућности снабдевања кречњаком. Као референтно налазиште изабран је рудник Ковиловача код Алексинца.

Таблица 5. Пројектне карактеристике кречњака

Параметар	Јединица	Стање кречњака	Потребне карактеристике кречњака за производњу гипс-картонских плоча
Слободна влага	% m/m	Пријемно	5,0
Калцијум карбонат, укупни као CaCO ₃	% m/m	Сув	94,0
Магнезијум карбонат, укупни као MgCO ₃	% m/m	Сув	
Нерастворене материје укључујући силицијум диоксид (киселе нерастворене материје)	% m/m	Сув	–
Силицијум диоксид као SiO ₂	% m/m	Сув	3,0
Оксиди гвожђа као Fe ₂ O ₃	% m/m	Сув	0,8
Укупне инертне материје (укључујући MgCO ₃)	% m/m	Сув	6,0
Гранулација	mm	Сув	19,05
Бондов индекс	kWh/t	Пријемно	10,8

Извор података: [2]

Таблица 6. Пројектни квалитет напојне воде

Параметар	Јединица	Вредност
pH	μS/m	7,9
Електропроводљивост	mg/l	7,9
Хемијски потребан кисеоник	mg/l	3,6
Растворене чврсте материје	mg/l	12
Укупна тврдоћа	mg/l	207
Cl	mg/l	16,5
Ca ²⁺	mg/l	54
SO ₄ ²⁻	mg/l	21,4
SiO ₂	mg/l	7
Na ⁺	mg/l	11,19
K ⁺	mg/l	1,81
Mg ²⁺	mg/l	17
Гвожђе	mg/l	0,18

Извор података: [4]

Пројектни квалитет напојне воде

Пројектни квалитет напојне воде у постројењу за одсумпорување димног гаса приказан је у табл. 6. Наведене вредности дате су на основу података о квалитету реке Дунав из које се предвиђа снабдевање постројења водом.

Манипулација добијеним нуспроизводом

Суспензија која се добија као нуспроизвод поступка влажног одсумпорувања димног гаса са кречњаком као сорбентом представља потенцијалну сировину за производњу гипса. При томе квалитет гипса зависи од неколико фактора, првенствено од квали-

тета улазних сировина (кречњак и вода). Из тог разлога планирани начин коришћења добијеног нуспроизвода такође представља важан фактор у дефинисању пројектних захтева који се постављају систему ОДГ. Овим пројектом предвиђена је могућност даљег коришћења гипса у комерцијалне сврхе.

Захтеви заштите животне средине

Захтеви заштите животне средине морају бити задовољени у складу са домаћом регулативом и то:

- заштита ваздуха – Правилник о граничним вредностима, методама мерења имисије, критеријумима за успостављање мерних места и евиденцију података, Сл. гласник РС бр. 54/92, 30/99 и 19/2006,
- заштита вода – Правилник о опасним материјама у водама, Сл. гласник РС 31/82, Правилник о квалитету воде за пиће, Сл. гласник РС 42/98, и
- заштита од буке – Правилник о дозвољеном нивоу буке у животној средини, Сл. гласник РС бр. 54/92.

Опис разматраних варијанти техничких и технолошких решења постројења за ОДГ

Постројење за ОДГ чине следећи основни системи:

- систем за ОДГ,
- систем за пријем кречњака и припрему суспензије,
- систем гипса,
- систем за снабдевање енергијом, и
- помоћни системи.

Систем за ОДГ обухвата апсорбер, пумпе за рецикулацију суспензије кречњака, канале димног гаса, вентилаторе димног гаса, регенеративни загрејач ваздуха (опционо) и димњак.

Апсорбери представљају кључну опрему постројења за ОДГ. За сваки од блокова ТЕ „Костолац Б” предвиђен је по један апсорбер торањског типа. Апсорбер има пет главних зона, гледано од дна ка врху: зону реакционог базена апсорбера, зону улаза струје димног гаса, зону распршивања процесне суспензије, зону елиминатора капљица и зону излаза струје димног гаса.

Током израде ПСО-ГП ТЕКБ разматране су различите пројектне варијанте које су се обухватиле:

- испоруку кречњака и припрему суспензије,
- вентилаторе димног гаса, и
- димњак.

Испорука кречњака и припрема суспензије

Реагенс који се користи у влажном поступку ОДГ је суспензија самлевоног кречњака. Разматране су две пројектне варијанте:

- испорука самлевоног кречњака са величином честица до 20 mm и припремом сорбента влажним млевењем на локацији, и
- испорука сувог, самлевоног кречњачког праха и припрема сорбента директним мешањем са водом у базену суспензије кречњака.

Обе варијанте обухватају испоруку кречњака камионима и обезбеђивање 14-дневне резерве кречњака на локацији. Дробљени кречњак складишти се на отвореном складишту, док се кречњачки прах складишти у бетонским силосима. Већина постројења за влажно ОДГ инсталираних широм света користи прву варијанту испоруке кречњака и припреме сорбента. Испорука издробљеног кречњака је јефтинија, расположивија и једноставнија за руковање од испоруке сувог кречњачког праха. Влажним млевењем на локацији осигурава се да суспензија кречњака буде увек задовољавајућег квалитета у погледу захтеване величине честица којом се обезбеђује одговарајућа ефикасност поступка ОДГ, што представља главни услов за остварење гаранција датих за карактеристике пречишћеног гаса, потрошњу кречњака и квалитет добијеног нуспроизвода процеса. Друга варијанта захтева мање инвестиционе трошкове и заузима мање простора на локацији.

Вентилатори димног гаса

Постојећи вентилатори димног гаса немају довољну снагу да савладају додатни отпор струјања гаса који се јавља као последица новоинсталисане опреме ОДГ постројења. За потребе решавања наведеног проблема предложена су два варијантна решења:

- Задржавање постојећих вентилатора димног гаса уз додатак по једног новог бустер вентилатора за сваки блок. Инсталација бустер вентилатора може да се уради током рада блокова термоелектране, тако да је потребан релативно мали период прекида рада како би се нови вентилатори повезали на излазне канале постојећих вентилатора димног гаса.
- Замена постојећих вентилатора димног гаса са по два нова вентилатора за сваки од блокова. Инсталација нових вентилатора и пратећих канала димног гаса захтеваће значајно дужи прекид рада блока, али ће потрошња енергије у овом случају бити мања у поређењу са варијантом са бустер вентилаторима.

Димњак

Третирани димни гас се из апсорбера усмерава ка димњаку, одакле се даље испушта у атмосферу. У пројекту су разматрана два решења димњака: употреба постојећег димњака након његовог облагања боросиликатним облогама у циљу додатне заштите од корозије и изградња новог, 200 m високог, димњака са засебном димном цеви, пречника 7 m, за сваки блок (апсорбер), који ће бити пројектован за рад са влажним гасом.

Опција која подразумева наставак употребе постојећег димњака подразумева постављање регенеративног гасно-гасног загрејача (ГГЗ) како би се обезбедило догревање димног гаса пре уласка у димњак до температуре која би спречила

кондензацију гаса и нагомилавање капљица течности на унутрашњој површини димњака. Процес поновног облагања постојећег димњака трајао би најмање 4 месеца. Како је постојећи димњак заједнички за оба блока ТЕ „Костолац Б”, облагање би захтевало прекид рада оба блока електране.

Димне цеви новог димњака биле би изграђене од пластике ојачане стакленим влакнима (енгл. Glass Fibre Reinforced Plastic – GFRP), материјала који обезбеђује високу отпорност на корозију у раду са гасом који је третиран влажним поступком одсумпоравања. У каналима димног гаса на изласку из апсорбера и димњаку постављени су посебно пројектовани елементи за уклањање капљица влаге из струје димног гаса.

На основу приказаних варијантних решења појединих делова постројења током израде ПСО-ГП ТЕКБ разматрано је осам варијанти укупног техничког решења постројења за ОДГ, које су приказане је у табл. 7.

Таблица 7. Преглед разматраних варијанти постројења за ОДГ

Варијанта	Испорука кречњака	Млевење кречњака на локацији	Вентилатори димног гаса	Димњак	Гасно-гасни загрејач
Базна	Грануларни	Влажно млевење	Постојећи + нови бустер вентилатори	Нови влажни димњак	Не
Варијанта 1	Грануларни	Влажно млевење	Постојећи + нови бустер вентилатори	Постојећи (новообложени)	Да
Варијанта 2	Самлевен	Не	Постојећи + нови бустер вентилатори	Нови влажни димњак	Не
Варијанта 3	Самлевен	Не	Постојећи + нови бустер вентилатори	Постојећи (новообложени)	Да
Варијанта 4	Грануларни	Влажно млевење	Нови	Нови влажни димњак	Не
Варијанта 5	Грануларни	Влажно млевење	Нови	Постојећи (новообложени)	Да
Варијанта 6	Самлевен	Не	Нови	Нови влажни димњак	Не
Варијанта 7	Самлевен	Не	Нови	Постојећи (новообложени)	Да

Опција одлагања гипса

Током израде ПСО-ГП ТЕКБ анализиране су три опције одлагања гипса:
 – одлагање сувог гипса (са 10% влаге) комерцијалног квалитета у простор површинског копа, са могућношћу његове касније продаје,

- одлагање суспензије гипса (са 50% влаге) у простор површинског копа, са рециркулацијом слободне воде са депоније у процес одсумпоравања димног гаса и могућношћу евентуалне касније продаје, и
- мешање суспензије гипса са густом хидромешавином пепела и шљаке и њено одлагање на депонију пепела и шљаке термоелектране.

Анализа и поређење предложених пројекћних варијанти

Свака од наведених варијанти има своје предности, али и недостатке. У наставку ће бити приказане најважније предности и недостаци наведених варијанти, како у техничко-технолошком смислу, тако и у погледу економских параметара и утицаја на рад термоелектране. Упоредни приказ пројекћних решења приказан је у табл. 8, 9 и 10.

Таблица 8. Поређење опција пројекћних решења испоруке кречњака на локацију

	Влажно млевење дробљеног кречњака на локацији	Млевење кречњака ван локације и испорука кречњачког праха
Технички аспекти	<ul style="list-style-type: none"> – Више простора на локацији – Више опреме која се мора одржавати – Боља контрола квалитета – Већи број снабдевача 	<ul style="list-style-type: none"> – Мање простора на локацији – Проблеми расипања кречног праха – Без могућности контроле квалитета – Тренутно без домаћих снабдевача
Економски аспекти	<ul style="list-style-type: none"> – Већи капитални трошкови – Мањи трошкови испоруке 	<ul style="list-style-type: none"> – Мањи капитални трошкови – Већи трошкови испоруке

Таблица 9. Поређење опција пројекћних решења вентилатора димног гаса

	Нови бустер вентилатори димног гаса (постојећи вентилатори димног гаса остају на истом месту)	Нови вентилатори димног гаса (уклањање постојећих вентилатора димног гаса)
Техничка изводљивост	<ul style="list-style-type: none"> – Изводљиво – Могуће коришћење постојеће конструкције која се налази око димњака, канала димног гаса и њихових ослонаца, темељне конструкције – Већа потрошња електричне енергије током рада 	<ul style="list-style-type: none"> – Изводљиво – Боље перформансе у раду у односу на постојеће вентилаторе – Потребно рушење свих постојећих објеката између димњака и електрофилтерског постројења
Капитални трошкови	7,6 милиона €	11,2 милиона €
Утицај на оперативне трошкове (15 година)	Базни	Уштеда 2,5 милиона €
Утицај на нерасположивост електране	0 недеља 0 €	4 недеље 5 милиона €

Таблица 10. Поређење опција пројектних решења димњака

	Постојећи димњак без модификација	Постојећи димњак са новим облогама и ГГЗ	Нови димњак (постојећи димњак остаје на истом месту)
Техничка изводљивост	Није изводљиво	Изводљиво. Обим радова зависи од стања димњака	Изводљиво
Утицај на капиталне трошкове	–	5,1 милиона €	11 милиона €
Утицај на експлоатационе трошкове	–	Висок: утицај ефикасности рада ГГЗ, трошкови рада и одржавања	Нема
Утицај на нерасположивост електране	0 недеља 0 €	16 недеља 20 милиона €	0 недеља 0 €
Ризици	Поузданост ГГЗ Потенцијално отказивање исправног рада димњака	Поузданост ГГЗ, неизван обим радова на постојећем димњаку, као и пратећи трошкови	Минимални

У табл. 11 приказано је поређење анализираних опција пројектног решења одлагања гипса. Поређење је извршено са неколико аспеката. Износ надокнаде за одлагање отпада разматра разлику између надокнада које би морале бити плаћене за различите опције одлагања. Основна разлика састоји се у поређењу надокнаде која би била одређена за случај одлагања гипса комерцијалног квалитета који би се посматрао као случај одлагања безбедног отпада и значајно више надокнаде која би морала бити плаћена уколико би се суспензија гипса одлагала заједно са мешавином пепела који је сврстан у групу опасног отпада.

Таблица 11. Поређење опција пројектних решења одлагања гипса

	Гипс комерцијалног квалитета; Одлагање у простор површинског копа	Одлагање суспензије гипса у простор површинског копа	Одлагање у виду густе суспензије пепела и гипса на депонију пепела
Утицај на капиталне трошкове	Додатни трошкови 3,3 милиона €	Уштеда 3 милиона	Уштеда 6 милионе €
Додатни трошкови рада и одржавања	0,5 милиона € годишње	0,05 милиона € годишње	Уштеда у поређењу са опцијом производње гипса комерцијалног квалитета
Износ надокнаде за одлагање отпада	Низак	Средњи	Висок
Могућност касније продаје гипса	Спреман за продају	Може се продати после додатног третмана	Нема могућности продаје

Дефинисање техничког решења постројења за ОДГ

Техно-економска анализа извршена током израде ПСО-ГП ТЕКБ резултирала је доношењем неколико кључних пројектних одлука које су дефинисале техничко решење постројења за ОДГ које је даље разрађено у идејном пројекту. Ове одлуке односе се на следеће:

- (1) **Апсорбер.** Пројектним решењем усвојен је апсорбер отвореног торањског типа са распршивањем. Саставни део апсорбера је реакциони базен којим се отклања потреба постојања посебног базена за производњу гипса. Изабрана је примена принудне *in situ* оксидације, јер обезбеђује избегавање оперативних проблема који се најчешће јављају при природној оксидацији. Поред тога, принудна оксидација је и најпогоднија за производњу гипса као нуспродукта ОДГ процеса. Апсорбер је опремљен двостепеним елиминатором капи како би се у највећој могућој мери спречило одношење капљица воде (суспензије) у димњак.
- (2) **Испорука кречњака и припрема суспензије.** Кречњак ће се испоручивати у виду издробљених кречњачких стена величине гранула до 20 mm, а суспензија кречњака ће се припремати поступком влажног млевења на самој локацији. Припрема суспензије кречњака обављаће се у циклусу млевења влажним кугличним млиновима, што такође представља најшире заступљен начин припреме процесног реагенса.
- (3) **Нови бустер вентилатори.** Као додатак постојећим вентилаторима димног гаса инсталираће се по један бустер вентилатор за сваки од блокова. Оваква конфигурација омогућава савладавање поменутих додатних отпора струјању димног гаса уз обезбеђење адекватне резерве капацитета.
- (4) **Нови влажни димњак.** Испуштање димног гаса после пречишћавања обављаће се кроз нови, влажни димњак. Ова опција је изабрана у циљу елиминисања негативних последица испуштања охлађених димних гасова засићених влагом кроз постојећи димњак термоелектране.
- (5) **Припрема суспензије кречњака.** Започиње у постројењу за млевење у ком се одвија млевење кречњака у кугличним млиновима, уз додавање воде за потребе добијања суспензије. Суспензија која излази из постројења за млевење прикупља се у резервоару суспензије кречњака. Напајање апсорбера свежеом суспензијом остварује се кроз цевну петљу у којој непрекидно циркулише суспензија кречњака.
- (6) **Примарно угушћење суспензије гипса.** За потребе примарног угушћења суспензије гипса предвиђено је коришћење хидроциклона, првенствено јер је то стандардна пракса која се примењује за производњу гипса у постројењима за ОДГ.
- (7) **Секундарно угушћење суспензије гипса.** Предвиђа се инсталација три хоризонтална тракаста вакуум филтра за потребе секундарног угушћења суспензије гипса. Употреба вакуум филтера усвојена је јер су поменути филтри једноставни за рад и одржавање, троше мање електричне енергије од конкурентних типова опреме нпр. центрифугалних бубњева.
- (8) **Одлагање суспензије гипса.** Уколико се не пронађе купац за произведену гипсану масу, пројектом је предвиђено да се суспензија гипса одлаже у предвиђени простор површинског копа Дрмно. Слободна вода која настаје после таложења суспензије

гипса у касети депоније се враћа у процес, односно користи се поново за транспорт суспензије, док се вишак воде одводи у базен отпадне воде из кога се каналише на даљи третман са осталим отпадним водама из ТЕ „Костолац Б”.

- (9) **Отпадне воде.** У оба разматрана случаја (производња гипса или депоновање суспензије гипса), део воде издвојен током примарног угушења суспензије одстрањује се из процеса одсумпоравања у отпадне воде, а у циљу спречавања прекомерне акумулације корозивних соли хлорида у процесној суспензији. Количина и основне карактеристике отпадних вода су следеће:

	Производња сувог гипса	Депоновање суспензије гипса
Количина отпадних вода, [m/h]	9,86	20,1
Садржај укупних чврстих материја, [%]	1,2	1,2
Количина укупних чврстих материја, [kg/h]	121	243
Садржај хлорида, [ppm]	386	276
Температура, [°C]	7020	1740
	64	64

Наведене карактеристике отпадних вода односе се на случај сагоревања угља средњег квалитета.

- (10) **Снабдевање електричном енергијом.** Напајање потрошача у саставу постројења за ОДГ је предвиђено са постојећег разводног постројења 110 kV смештеног уз електрану, које се за ове потребе проширује за два нова поља. Да би се проширење омогућило, продужене су сабирнице за још два поља са потребним порталима. Опрема за заштиту и управљање новим 110 kV пољима биће смештена у постојећој командној згради RP 110 kV. Од новоизграђених поља до трансформатора 110/6,6 kV предвиђене су везе једножилним 110 kV кабловима (2 XLPE, 3 1 150/95 mm² Al), дужине сваког кабла око 600 m. Снабдевање електро потрошача постојења за ОДГ, осим бустер вентилатора који се напајају са сопствене потрошње блокова Б1/Б2, врши се преко два уљна регулациона трансформатора 110/6,6 kV снаге сваки по 16 MVA, смештена на отвореном, поред пумпне станице постројења за ОДГ. Трансформатори су димензионисани тако да један подмирује оптерећења за напајање система ОДГ оба блока, па један другом чине 100%-тну резерву у напајању.
- (11) **Снабдевање напојном водом.** Снабдевање напојном водом је предвиђено из багер станице, из базена „спирне воде”, који је повезан са прекидном комором. За транспорт воде до резервоара напојне воде, који је лоциран уз постројење за млевање кречњака, предвиђене су пумпе капацитета $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$, напона $H = 3 \text{ bar}$ (1 радна + 1 резервна). Потисни цевовод се предвиђа од пластичних PE HD цеви пречника 250 mm.

(12) **Хидротехничке инсталације.** Снабдевање објеката постројења за ОДГ питком водом, противпожарном водом, као и одвођење санитарних отпадних вода је предвиђено прикључењем на постојећу мрежу термоелектране најкраћим водом. Капацитет постојеће мреже је довољан да прими нове потрошаче из разматраног постројења.

Најзначајнији параметри материјалних биланса гасне фазе, воде, суспензије и гипса за изабрано техничко решење и за угаљ средњег квалитета приказани су у табл. 12.

Таблица 12. Најзначајнији параметри материјалних биланса гасне фазе, воде, суспензије и гипса за угаљ средњег квалитета

Параметар	Јединица	Величина
<i>Улазни параметри димног гаса</i>		
Количина димног гаса на улазу у постројење за ОДГ (влажни, 1,013 mbar, 0 °C)	m ³ /h	1,994.400
Концентрација SO ₂ на улазу у апсорбер (суви, 1,013 mbar, 0 °C, 6% O ₂)	mg/m ³	6590
Температура димног гаса на улазу у апсорбер	°C	170
Садржај воде у димном гасу	%	17,8
<i>Изразни параметри димног гаса</i>		
Количина димног гаса на излазу из апсорбера (влажни, 1,013 mbar, 0 °C)	mg/m ³	2,170.350
Температура димног гаса на излазу из апсорбера	°C	64
Садржај воде у димном гасу на излазу из апсорбера	%	23,9
Концентрација SO ₂ на излазу из апсорбера (суви, 1,013 mbar, 0 °C, 6% O ₂)	mg/m ³	393
Концентрација честица летећег пепела на излазу из апсорбера (суви, 1,013 mbar, 0 °C, 6% O ₂)	mg/m ³	15
Температура чистог гаса на излазу из постројења	°C	64
<i>Процесни параметри</i>		
Потрошња електричне енергије (за оба блока)	MWh/h	18–20,4
Уклоњени сумпор диоксид	t/h	8,8
Потрошња процесне воде (по блоку)	m ³ /h	175
Потрошња кречњака	t/h	14,9
Суспензија гипса на излазу из апсорбера (15% концентрације чврсте материје)	m ³ /h	172,0
Повратна вода из хидроциклона суспензије гипса (3% концентрације чврсте материје)	m ³ /h	137,5
Количина суспензије гипса (50% концентрације чврсте материје)	m ³ /h	34,5

Локација постројења за ОДГ

Већи део постројења за ОДГ смештен је на слободном простору који се налази између постојећег димњака и постојећих и будућих косих мостова за транспорт угља. Диспозиција објеката у оквиру постројења пројектована је тако да се не угрози функционалност новог система за транспорт пепела и шљаке и осталих постојећих објеката термоелектране, у првом реду допреме угља до котловских бункера. Површина простора потребног за смештај ОДГ постројења износи приближно 16 000 m². Изван поменутог простора, на делу североисточно од складишта мазута, смештено је отворено складиште кречњака, површине око 10 000 m², које представља резерву силовине за двонедељни рад постројења у условима сагоревања угља средњег квалитета.

ЗАКЉУЧАК

На основу искуства стеченог током израде Претходне студије оправданости са Генералним пројектом одсумпоровања димног гаса ТЕ „Костолац Б”, може да се закључи следеће:

- (1) Потребно је дефинисати квалитет угља у наредном периоду. Дефинисање квалитета угља треба да обухвати податке техничке и елементарне анализе, при чему су посебно важни доња топлотна моћ, садржај влаге и пепела, садржај сумпора, форме сумпора у угљу и степен везивања сумпора током процеса сагоревања. Додатно, потребно је дефинисати и садржај хлора и флуора у угљу.
- (2) Потребно је дефинисати карактеристике димног гаса како на бази прорачуна, тако и на основу мерења емисије на блоковима термоелектрана.
- (3) Потребно је дефинисати карактеристике кречњака који ће се користити за припрему суспензије. Најважније карактеристике које треба дефинисати су састав и реактивност кречњака. У случају избора кречњака потребно је обратити пажњу и на могућности транспорта кречњака у потребним количинама.
- (4) Потребно је размотрити све варијанте техничких и технолошких решења постројења ОДГ која обухватају начин испоруке кречњака и припреме суспензије, избор вентилатора, димњака и начина одлагања гипса.

На основу разматраних варијанти техничких и технолошких решења постројења ОДГ за ТЕ „Костолац Б” изабрано је:

- влажно млевење дробљеног кречњака на локацији,
- додавање нових бустер вентилатора димног гаса,
- изградња новог влажног димњака, и
- добијање гипса комерцијалног квалитета или одлагање суспензије гипса у простор површинског копа.

Изабрано техничко и технолошко решење постројења ОДГ је основ за израду Студије оправданости са Идејним пројектом одсумпоровања димног гаса ТЕ „Костолац Б”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ***, Правци оптималног смањења емисије сумпорних оксида из термоелектрана Електропривреде Србије, Енергопројект–ЕНТЕЛ, Београд, 2006.
- [2] ***, Претходна студија оправданости са генералним пројектом Одсумпоравање димних гасова ТЕ „Костолац Б”, Машински факултет, Универзитет у Београду, 2007.
- [3] ***, Извештај о испитивању степена отпрашивања електрофилтера и емисије штетних материја у ТЕ „Костолац Б” у 2004. години, Рударски институт, Завод за термотехнику, вентилацију и заштиту средине, Београд, 2005.
- [4] ***, Елаборат о класификацији и категоризацији резерви угља ПК „Дрмно”, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2004.
- [5] ***, Идејни пројекат развоја ПК „Дрмно” (II фаза), Рударски институт и Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2003.
- [6] ***, Студија оправданости експлоатације преосталих резерви угља ПК „Дрмно”, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2006.

Abstract

Selection of Optimal Technical Solution for Flue Gas Desulphurisation Plant on TPP „Kostolac B”

by

*Dragoslava STOJILJKOVIĆ¹, Aleksandar JOVOVIĆ¹, Vladimir JOVANOVIĆ¹,
Nebojša MANIĆ¹, Djordjina MILOVANOVIĆ², Sanja PETROVIĆ²,
Lynn RUBOW³, Mihajlo GAVRIĆ⁴, and Zrinka ŽBOGAR⁴*

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

² Energoprojekt – ENTEL, Belgrade, Serbia

³ Parsons E&C Bulgaria Ltd., Sofija, Bulgaria

⁴ Electric Power Industry of Serbia, Belgrade, Serbia

According to own orientation for domestic power plants to fulfill requirements of the EU Directives for environmental protection, the Electric Power Industry of Serbia was started process of designing flue gas desulphurization (FGD) facilities for reduction emissions of sulphur oxides. Toward conclusions of Study: “Optimal Direction for Reduction of Sulphur Oxides Emissions from Thermal Power Plants of the Electric Power Industry of Serbia” TPP Kostolac B was chosen as the first power plant for construction of this type of facility. Development of technical documentation is in progres for obtaining construction permit for FGD plant as well as preparation of tender documentation for selection of project consultant for system startup. Due to previously accepted analysis, wet limestone/gypsum process is defined as referential process of desulphurisation.

As required FGD plant is introduced as separate system in TPP, and on the other hand as part of the TPP as a whole, design must consider all demands related to coupling

the FGD plant with existing processes of TPP, to provide continuous operation for the following period.

In this paper are presented: (1) main requirements which introduce initial parameters for FGD plant design, related to demanded quality of sorbent and water, flue gas composition and demanded flue gas desulphurisation efficiency; (2) fundamental characteristics of main systems of FGD plant; (3) possible options for technical solutions of FGD from the point of fitting into available space and coupling with existing systems of TPP, and (4) suggestion for optimal solution of FGD from the aspect of functionality and reliability, investment, and operative costs.

Key words: *desulphurisation, flue gas, power plant*

Одговорни аутор / Corresponding author (D. Stojiljković)
E-mail: dstojiljkovic@mas.bg.ac.rs