

ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГЕТСКОГ ПОТЕНЦИЈАЛА ОТПАДА ОД КАФЕ

EXAMINATION OF SPENT COFFEE GROUNDS ENERGY POTENTIAL

Михаило ВЛАДИЋ, Небојша МАНИЋ, Никола КАРЛИЧИЋ*,
Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд

Konsumiranje kafe je dnevni ritual rasprostranjen širom sveta. Procenjeno je da se u svetu popije čak 2,25 milijardi šoljica ovog napitka u jednom danu, čime se proizvodi velika količinu otpada. U radu je ispitan energetski potencijal ovog otpada metodom tehničke i termalne analize. Rezultati ispitivanja su pokazali niske vrednosti HGI, nizak sadržaj volatila i koksnog ostatka usled velike količine vlage

.Кljučне речи: *otpad od kafe; energija iz otpada; tehnička analiza; termalna analiza*

Drinking coffee is a daily ritual all over the world. It is estimated that as many as 2.25 billion cups of this beverage are consumed in one day, which produces a large amount of waste. The paper examines the energy potential of this waste using the method of technical and thermal analysis. The test results showed low HGI values, low content of volatiles and coke due to a large amount of moisture.

Key words: *Spent coffee grounds; waste to energy; proximate analysis; thermal analysis*

1 УВОД

Живимо у времену које карактерише интезивно коришћење енергије у свим пољима људског живота. Такав приступ располагању енергетским ресурсима је растући тренд, за који не постоје назнаке да ће се зауставити. Проблем у томе је што се највећи део енергетских потреба и даље задовољава коришћењем фосилних горива. Поред тога што најзаступљенијих енергената има све мање, њихово коришћење неповољно утиче на животну средину. Сходно томе, целокупна енергетска политика тежи да се потпуно окрене обновљивим изворима енергије и тако у потпуности избаци фосилна горива из употребе. Такав заокрет оправдавају бројне предности обновљивих извора. Изузетно низак степен загађења, доступност, цена, енергетски потенцијал и квалитет добијене енергије су само неки од њих. Са аспекта сагоревања као процеса трансформације енергије, директна замена фосилних горива би била биомаса, јер се може користити у облику чврстог, течног и гасовитог горива.

Деф. 1. „Биомаса представља биоразградиви део производа, отпада и остатака биолошког порекла из пољопривреде, шумарства и повезаних индустрија, као и биоразградиви део индустријског и комуналног отпада.“ [1]

Познавајући основне појмове биомасе, идеја овог истраживања је била да се одабере и испита узорак који поседује одређени енергетски потенцијал, свима је доступан, а опет неповољно испитан и искоришћен као енергент. Узевши у обзир све наведене факторе, за узорак је изабрана кафа, тачније млевени остатак кафе након припремања напитака на апаратима за кафу. Потенцијал је уочен у великој количини отпада која настаје прилоком прављења ових напитака, о чијој широкој употреби сви сведочимо.

* Corresponding author, e-mail: nkarlicic@mas.bg.ac.rs

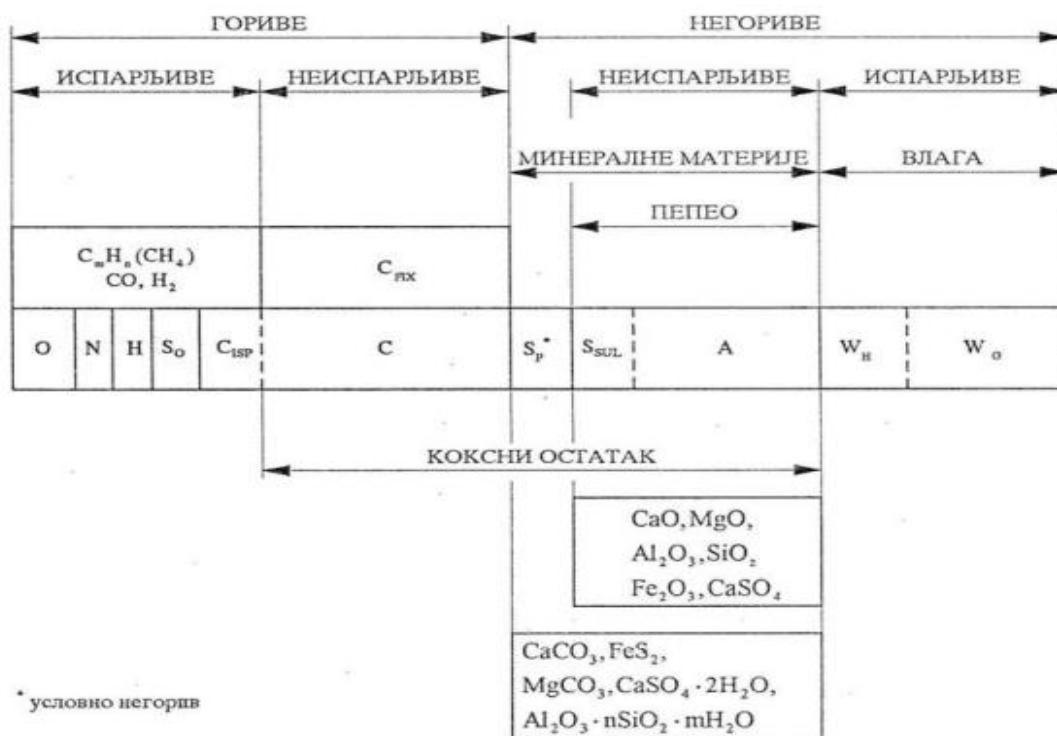
2 ТЕХНИЧКА АНАЛИЗА

Техничка анализа представља скуп различитих особина горива које указују на могућности адекватне примене тог горива, нарочито чврстог. Техничка анализа се заснива на термичком разлагању масе горива, процесу који обухвата све методе коришћења чврстих горива, при чему се добијају испарљиве и неиспарљиве материје. Као последица сложене структуре чврстих горива, наведне материје садрже гориве и негориве компоненте. Све четири врсте наведених компоненти горива заједно представљају основне податке техничке анализе.

Подаци техничке анализе:

- садржај негоривих испарљивих материја – садржај грубе влаге и хигроскопске влаге
- садржај горивих испарљивих материја (волатила), у чијем се саству налазе испарљиви угљеник и водоник, и условно кисеоник и азот
- садржај негоривих неиспарљивих материја – садржај минералних материја (пепела)
- садржај коксног остатка – горивих и негоривих неиспарљивих материја.

Поред ових карактеристика, подаци техничке анализе су још и топлотна моћ, понашање пепела на повишеним температурама, дужина и боја планема, изглед и структура коксног остатка и др.



Слика 1. Подаци техничке анализе [2]

3 МЕТОДЕ ТЕХНИЧКЕ АНАЛИЗЕ

3.1 Одређивање садржаја влаге

Садржај влаге у гориву неповољно утиче на његову ефикасност, јер се део количине топлоте троши за њено испаравање, снижава топлотну моћ, а утицајем на масу горива, диктира цену његовог транспорта. Разликују се три врсте влаге: груба (површинска), хигроскопска (унутрашња) и конституциона. У техничким прорачунима се конституциона влага занемарује, тако да укупна влага представља збир грубе и хигроскопске.

– Одређивање садржаја грубе влаге сушењем на ваздуху [3]:

На ваги тачности 0,1% измерен је послужавник без узорка. Затим, равномерно распоређен узорак у посуди се поново мери на ваги. После другог мерења, посуда са узорком се одлаже на место погодно сушењу на ваздуху током 24 часа. Добијена маса након сушења представља аналитичку масу узорка.

Образац за израчунавање губитка грубе влаге у узорку сушеном на ваздуху:

$$M_f = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\% \text{ m/m}],$$

где је:

M_f - губитак влаге у узорку сушеном на ваздуху [% m/m]

m_1 – маса празне посуде [g]

m_2 – маса посуде и узорка пре сушења на ваздуху [g]

m_3 – маса посуде и узорка после сушења на ваздуху [g]



Слика 2. Узорак на послужавнику пре сушења

– Одређивање садржаја хигроскопске влаге:

Припрема аналитичког узорка за одређивање садржаја хигроскопске влаге врши се у-ситњавањем кроз сито (слика 3), да би добијени узорак био у складу са стандардом SRPS EN 14780. Измери се маса празне посуде са поклопцем, а потом у њу сипа око 1g узорка и поново измери маса пре сушења (слика 4). Отворена посуда са узорком и поклопац посуде се стављају у сушницу где се узорак суши у атмосфери ваздуха на претходно достигнутој температури од 105 °C до 110 °C, у трајању од 2 сата. Након сушења, када се посуда извади из сушнице, затворити посуду поклопцем и оставити је да се хлади на керамичкој плочи не дуже од 5 минута. Потом се посуда са узорком пребацује у дексикатор где се хлади до собне температуре. Када узорак достигне собну температуру, потребно је поново извршити мерење масе.

Образац за израчунавање садржаја хигроскопске влаге у узорку:

$$M_{ad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\% \text{ m/m}],$$

где је:

M_{ad} – губитак хигроскопске влаге у узорку [% m/m]

m_1 – маса празне посуде [g]

m_2 – маса посуде и узорка пре сушења [g]

m_3 – маса посуде и узорка после сушења [g]



Слика 3. Сито



Слика 4. Посуда са узорком

3.2 Одређивање садржаја волатила

Гориве испарљиве материје, односно једним именом волатили су веома значајна компонента горива јер са кисеоником стварају смешу која обезбеђује паљење, односно сам почетак сагоревања горива.

Одређивање садржаја горивих испарљивих материја у чврстим биогоривима се одређује у складу са одредбама стандарда SRPS EN 15148. Први корак у извођењу експеримента је загревање муфолне пећи до температуре од 900 ± 10 °C. Празна посуда са поклопцем се ставља у муфолну пећ где се загрева у трајању од 7 минута. Након тога се хлади у десикатору, а затим мери маса такве празне посуде са поклопцем. У ту посуду се затим издваја приближно 1 g аналитичког узорка, измери му се масу и постави у муфолну пећ да се жари у трајању од 7 минута. Након тога се узорак вади на керамичку плочу, хлади до собне температуре у десикатору и понавља мерење. Процент масеног удела волатила израчунава се из губитка масе узорка.

Образац за израчунавање садржаја волатила:

$$V_d = 100 \cdot \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} - M_{ad} \quad [\% \text{ m/m}],$$

где је:

V_d – садржај волатила у узорку [% m/m]

m_1 – маса празне посуде [g]

m_2 – маса посуде и узорка пре жарења [g]

m_3 – маса посуде и узорка после жарења [g]

3.3 Одређивање садржаја пепела

Пепео представља непожељни део горива јер смањује удео горивих компоненти, отежава сагоревање и директно утиче на повећање трошкова транспорта горива и одржавања постројења.

Одређивање садржаја пепела се врши у складу са одредбама стандарда SRPS EN 14755. Пре мерења се врши загревање празне посуде у пећи на температури од 550 ± 10 °C у трајању од једног сата. Мерење се врши након што је посуда извађена из пећи и охлађена у десикатору. Количина од око 1 g аналитичког узорка се уноси у посуду, а затим се понавља мерење. Посуда са узорком се ставља у пећ у којој се температура равномерно подиже до 250 ± 10 °C у току од 50 минута. Испаравање волатила из узорка пре паљења се остварује одржавањем

температуре у периоду од 60 минута. По завршетку овог корака наставља се равномерно подизање температуре у пећи до 550 ± 10 °C током 60 минута и одржавање ове температуре најмање 120 минута. Након свега тога посуда са пепелом се вади из пећи, хлади се у десикатору до амбијенталне температуре, и потом се мери маса посуде са пепелом. Садржај пепела у аналитичком узорку се добија применом следећег обрасца:

$$A = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\% \text{ m/m}],$$

где је:

A – садржај пепела у аналитичком узорку [% m/m]

m_1 – маса празне посуде [g]

m_2 – маса посуде и узорка пре спаљивања [g]

m_3 – маса посуде и узорка после спаљивања [g]

3.4 Одређивање горње топлотне моћи

Горња топлотна моћ представља количину топлоте која се добија потпуним сагоревањем јединице масе горива под следећим условима:

1. Сумпор и угљеник из горива се налазе у облику својих диоксида у гасовитом стању, док до оксидације азота није дошло;
2. Продукти сагоревања су доведени до температуре коју је гориво имало пре почетка сагоревања (20 °C);
3. Вода, која потиче од влаге из горива и сагорелог водоника, преведена је у течно стање

Одређивања топлотне моћи биогорива се врши у складу са одредбама стандарда ISO 1928 којим је дефинисано одређивање горње топлотне моћи горива при константној запремини, на температури од 25 °C, у калориметру са бомбом калибрисаним сагоревањем бензо-еве киселине. Припрема се састоји из мерења око 1 g узорка који стављамо у одговарајућу посуду. Затим у ту исту посуду са узорком ураћамо фитиљ завезан за жицу која ће касније иницирати паљење. У бомбу се доводи кисеоник и одводе продукти сагоревања. Такође, калориметар поседује мешач воде ради равномернијег загревања воде, као и термометар.

4 ТЕРМАЛНА АНАЛИЗА

Термална анализа је грана науке о материјалима која се заснива на проучавању промене својства материјала у зависности од промене температуре. Примена ове методе захтева веома прецизно мерење температуре, промене масе, димензија итд. Неопходно је да сва ова мерења буду извршена у инертној атмосфери аргона, како би се избегле реакције узорка са ваздухом. У зависности од жељених информација о материјалу који се испитује, могу се применити различите термоаналитичке технике [4]. Током испитивања разматраног узорка коришћене су следеће технике:

Термогравиметријска анализа (TGA - Thermogravimetric analysis)

Техника којом се региструје промена масе узорка у функцији температуре. Термогравиметријска крива даје квантитативне информације о саставу узорка, термичкој стабилности и садржају лако испарљивих гасова (влаге). Термичка стабилност је највиша вредност температуре до које се узорак може довести тако да не дође до његове разградње на хемијском нивоу.

Деривативна термогравиметрија (DTG - Differential Thermogravimetric analysis)

Ова техника представља брзину промене масе током разградње. Захваљујући кривој која представља први извод TGA криве, промена масе се може лакше уочити. Стога TGA и DTG су најчешће приказане у пару.

Диференцијална термичка анализа (DTA - Differential thermal analysis)

Користи се за праћење промене температуре узорка у односу на референтну супстанцу. Крива која се добија применом ове технике нам говори да ли се ради од ендо- или егзотермних реакцијама, односно о топлотним ефектима хемијских реакција. Ендотермне реакције препознајемо по карактеристичном пику усмереном навише, док је код егзотермних тај пик усмерен наниже.

5 ОБРАДА РЕЗУЛТАТА

5.1 Мерење садржаја влаге

Табела 1: Резултати мерења садржаја грубе влаге сушењем ваздуху:

	Маса посуде, g	Губитак грубе влаге, %
Без узорка	208,1	3,02
Са узорком пре сушења,	506	
Са узорком након сушења	497	

На основу резултата приказаних у табели 1, користећи једначину (1) добијамо да губитак грубе влаге у узорку сушеном на ваздуху износи **3,02 % m/m**.

Табела 2: Резултати мерења садржаја хигроскопске влаге:

	Прво мерење		Друго мерење	
	Маса посуде, g	Садржај хигроскопске влаге, %	Маса посуде, g	Садржај хигроскопске влаге, %
Без узорка	23,71	51,73	23,81	51,71
Са узорком пре сушења,	24,67		24,70	
Са узорком након сушења	24,17		24,24	

Садржај хигроскопске влаге рачунамо помоћу једначине (2). Просечну вредност садржаја хигроскопске влаге израчунава се као аритметичка средина добијених вредности за оба мерења, тако да за вредности приказане у табели 2 он износи **51,72% m/m**.

Садржај укупне влаге у узорку је функција садржаја грубе (M_f) и садржаја хигроскопске влаге (M_{ad}). Рачуна се према обрасцу:

$$M_T = M_f + M_{ad} \cdot \left(1 - \frac{M_f}{100}\right),$$

и износи 53,18%.

5.2 Мерење волатила

Садржај волатила рачунамо помоћу једначине (3). Просечна вредност садржаја волатила израчунава се као аритметичка средина добијених вредности за оба мерења, тако да за вредности приказане у табели 3 он износи 41,33660% m/m.

Табела 3. Резултати мерења садржаја волатила

	Прво мерење		Друго мерење	
	Маса посуде, g	Садржај волатила, %	Маса посуде, g	Садржај волатила, %
Без узорка	12,42750	41,23774	13,17560	41,33660
Са узорком пре жарења	13,21695		14,06655	
Са узорком након жарења	12,48310		13,23665	

5.3 Мерење садржаја пепела

Табела 4. Резултати мерења садржаја пепела

	Прво мерење		Друго мерење	
	Маса посуде, g	Садржај пепела, %	Маса посуде, g	Садржај пепела, %
Без узорка	16,81635	0,40540	17,61200	0,55244
Са узорком пре спаљивања	17,64270		18,77050	
Са узорком након спаљивања	16,8190		17,61840	

Садржај пепела рачунамо помоћу једначине (4). Просечну вредност садржаја пепела израчунава се као аритметичка средина добијених вредности за оба мерења, тако да за вредности приказане у табели 4 он износи **0,47892% m/m**.

5.4 Мерење садржаја коксног остатка

Садржај коксног остатка добијамо одузимањем збира укупног садржаја влаге и укупног садржаја волатила у узорку од целокупне масе:

$$КО = 100 - (M_T + V_d) = 5,48538 \% \text{ m/m}.$$

5.5 Одређивање горње топлотне моћи

На основу мерења извршеног на ИКА С200 калориметарском систему (слика 5), добијена вредност горње топлотне моћи узорка кафе износи **10,735 MJ/kg**.

Табела: Приказ резултата техничке анализе

Влага, %m/m	Волатили, %m/m	Пепео, %m/m	Коксни остатак, %m/m	Горња топлотна моћ, MJ/kg
53,18	41,34	0,48	5,5	10,735



Слика 5. Приказ интерфејса калориметарског система ИКА С200

5.6 Термална анализа

Применом претходно наведених техника, посредством Netzsch STA 449 F3 Jupiter система (слика 6), извршена је термална анализа. Резултати су приказани графички, у виду кривих за сваку примењену технику појединачно (график 1).



Слика 6. Netzsch STA 449 F3 Jupiter

Посматрањем TGA криве најпре се уочава њен опадајући карактер, што и јесте свакако било очекивано. Детаљнију информацију нам показује DTG крива, која показује брзину промене масе. На само почетку, до 100 °C, има нагли пад што је последица испаравања влаге из узорка. Затим је до око 220 °C губитак масе релативно константан, али од 220 °C до 420 °C долази до деволатилизације па се опет уочава пад криве. Карактер криве након тога остаје без значајнијих промена.

Анализом DTA криве добија се информација о топлоти која је утрошена или ослобођена током испитивања узорка. Први превој на око 110 °C указује на ендотермну реакцију услед испаравања влаге. Следећи, такође ендотермни превој криве се уочава након процеса ослобађања волатила, при температури од око 450 °C. Благи, егзотермни пикови се појављују на 600 °C и 800 °C, који представљају ослобађање топлоте услед сагоревања волатила.

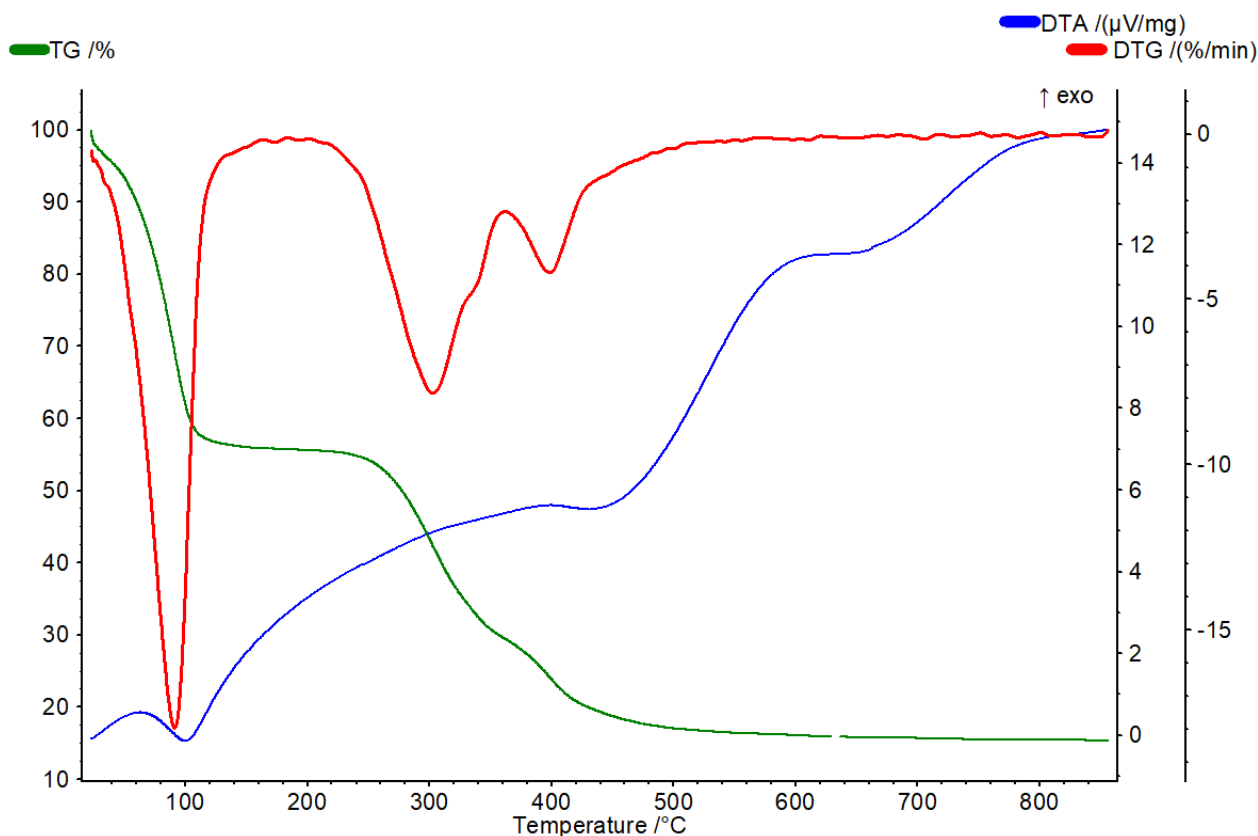


График 1. Приказ резултата термалне анализе

Слика 9. Графички приказ резултата термалне анализе

6 ЗАКЉУЧАК

Добијени резултати техничке и термалне анализе показују да кафа поседује енергетски потенцијал, али да је за максималну ефикасност неопходна одређена припрема узорка. Испитивани узорак је дао ниске вредности топлотне моћи, услед велике количине влаге. Велика количина влаге је последица коришћења воде током процеса прављења напитка од кафе, која директно пролази кроз узорак и натапа га. Сушење на ваздуху у дужем временском периоду би била довољна припрема за боље резултате. Низак садржај волатила и коксног остатка је такође последица велике влажности узорка. На добијене резултате утиче и то што је узорак у виду сировине, без икаквих технолошких захвата који би побољшали његове гориве перформансе.

7 ЛИТЕРАТУРА

- [1] *** Директива 2009/28/ЕЗ
- [2] **Манић Н. Г.:** Сагоревање пелета од биомасе у пећима за домаћинство, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2014.
- [3] **Манић Н. Г.:** Посебна поглавља из сагоревања – Техничка анализа горива
- [4] **Барта Холо Б.:** Термичка анализа у неорганској хемији, Природно-математички факултет, Нови Сад, 2021.