

Марина П. Јовановић*, **Валентијина М. Турањанин**,
Биљана С. Вучићевић, **Милада Л. Пезо**, **Вукман В. Бакић**

Лабораторија за термотехнику и енергетику,
Институт за нуклеарне науке „Винча”, Универзитет у Београду, Београд, Србија

Процена одрживости опција енергетског система који користи гас и обновљиве изворе енергије за добијање санитарне топле воде

Стручни рад
UDC: 662.63/.64+662.95:620.97

Неке од могућности замене фосилних горива која се користе за производњу топлојне енергије су биомаса и соларна енергија. Овај рад представља оцену различитих опција енергетских система за производњу топлојне енергије у топлани. Топлана „Церак” се налази у склопу ЈКП „Београдске електричне” и као основно гориво користи гас и мазут. Производи топлојну енергију за потребе грејања и загревања топлојне воде (приближно 17000 домаћинстава). Изабрано је неколико могућности које укључују коришћење обновљиве енергије уместо фосилних горива за добијање топлојне енергије у процесу загревања санитарне топле воде. Према потреби топлојној енергији у овом раду је урађена процена одрживости различитих енергетских опција за неколико случајева: (1) топлојна енергија добијена сагоревањем гаса, (2) топлојна енергија добијена сагоревањем гаса и из соларних колектора, (3) топлојна енергија добијена сагоревањем биомасе, (4) топлојна енергија добијена сагоревањем гаса и биомасе, и (5) топлојна енергија добијена сагоревањем гаса и биомасе и добијена из соларних колектора. Добијени резултати су упоређени преко општег индекса одрживости који представља меру комплексности система.

Кључне речи: обновљива енергија, производња топлојне енергије, општи индекс одрживости

Увод

Према последњим подацима укупна потрошња енергије у свету прелази 14 теравата годишње. Од те количине нафта учествује са 35%, гас са 20,7%, нуклеарна

* Одговорни аутор; електронска адреса: marinaj@vinca.rs

енергија са 6,3%, енергија воденог потенцијала са 2,2%, биомаса са 10%, угља са 25,3% и остали енергетски извори имају учешће око 0,5%. Повећање коришћења фосилних горива све више загађује животну средину, доводи до климатских промена и сталног пораста цене нафте и гаса на светском тржишту. Коришћење обновљивих извора енергије као што су водени потенцијал, ветар, сунчево зрачење, енергија таласа, биомаса, геотермална енергија, отпад и други могу да замене одређене количине енергије које би се добиле коришћењем фосилних горива. Очекује се да ће коришћење обновљивих извора енергије до 2020. имати годишњи раст од 4–6% [1].

Обим и структура енергетских резерви и ресурса Србије је веома неповољна. Резерве квалитетних енергената, као што су нафта и гас су симболичне и чине мање од 1% у укупним билансним резервама Србије, док преосталих 99% енергетских резерви чине разне врсте угља, у коме доминира нискоквалитетни лигнит, са учешћем од преко 92% у укупним билансним резервама.

Енергетски потенцијал наведених обновљивих извора енергије у Србији, је веома значајан и износи преко 3 Мтен годишње (са потенцијалом малих хидроелектрана, од око 0,4 Мтен). Око 80% укупног потенцијала налази се у искоришћењу биомасе, од чега око 1,0 Мтен, чини потенцијал дрвне биомасе (сеча дрвета и отпаца дрвне масе при њеној примарној и/или индустријској преради), а више од 1,5 Мтен чини пољопривредна биомаса (остаца пољопривредних и ратарских култура, укључујући и течни стајњак). Енергетски потенцијал постојећих геотермалних извора у Србији, износи близу 0,2 Мтен, на територији Војводине, Посавине, Мачве, Подунавља и ширег подручја централне Србије као и у постојећим бањама [2].

У оквиру категорије обновљиви извори енергије (ОИЕ), у Стратегији енергетског развоја Србије до 2015, у које спадају биомаса, хидропотијали малих водених токова (са објектима до 10 MW), геотермална енергија и енергије ветра и сунчевог зрачења, треба истаћи и да у Србији постоје посебне погодности и потребе за њихово организовано коришћење у тзв. децентрализованом производњи топлотне (сагоревањем биомасе и „сакупљањем” сунчевог зрачења) и електричне енергије (изградњом мини хидроелектрана, снаге до 10 MW и ветрогенератора, снаге до 1 MW), за задовољење потреба локалних потрошача као и испоруке вишкова електричне енергије локалној мрежи у оквиру електроенергетског система Србије [3].

Различите енергетске опције за производњу потрошне топле воде у домаћинствима

Овај рад представља оцену различитих опција енергетских система за производњу потрошне топле воде. Урађена је анализа одрживости енергетских система који користе биомасу и енергију сунчевог зрачења као могуће замене коришћења фосилних горива.

Топлана „Церак” се налази у склопу ЈКП „Београдске електране” и производи топлотну енергију за потребе грејања и загревања потрошне топле воде. У топлани се као основно гориво користи гас или мазут. Укупни инсталирани капацитет котлова је 244 MW, а конзума (17.000 домаћинстава који су прикључени на систем даљинског грејања) 230 MW за грејање и потрошну топлу воду. Пројектовани режим

рада топлане је 60/40 °C, са протоком од 250 m³/h за производњу санитарне топле воде. У анализи је усвојено да је радни век трајања котла 15 година. Такође је претпостављено да је средња вредност температуре воде 45 °C при потрошњи од 2,8 kWh по дану и по домаћинству [4]. У прорачуну емисије гасова узете су следеће вредности коефицијената емисије гасова: $k_E = 50,33 \text{ kg CO}_2/\text{GJ}$ и $k_E = 0,00561 \text{ kg NO}_x/\text{kg гаса}$ [5].

Тојлојтна енергија добијена сагоревањем гаса
(Опција: гас)

Ова енергетска опција подразумева производњу топлотне енергије сагоревањем гаса у топлани. Инсталирани капацитет котла који производи топлотну енергију је 10 MW. Количина топлоте која се са горивом унесе у котло (хемијска енергија гаса) је 205,998 GJ годишње. У прорачуну су узете следеће вредности: топлотна вредност гаса од 34 MJ/m³, или 45,5 MJ/kg, и захтевана количина гаса за једну годину од 6.058,773 m³. Укупна количина финалне енергије неопходна за загревање воде до жељене температуре је 183,338 GJ годишње. Према подацима из литературе, цена гаса за потрошаче у индустрији је 0,393 €/m³. Према статистичким подацима о ценама гаса, она је варијирала у периоду од 1991–2006, тако да је у прорачуну усвојен годишњи пораст цене од 6%. Исто тако, усвојена је ефикасност котла од 90%, а цена инвестиција 20 10⁴ € [6, 7].

Тојлојтна енергија добијена из комбинованог циклуса
(Опција: гас + соларна енергија)

Ова енергетска опција претпоставља добијање топлотне енергије сагоревањем гаса у котлу и из соларног топлотног система. Симулацијом у програму TRNSYS добијена је количина топлоте из соларних колектора и из котла у комбинованом систему за производњу топлотне енергије [8]. Укупна произведена топлотна енергија сагоревањем гаса је 164,593 GJ годишње, док је укупна потрошња гаса 5.439,305 m³ годишње. Прорачун је урађен за вакуумски тип колектора произвођача „Aprikus”, укупне колекторске површине од 5000 m², апсорпционе површине од 2760 m², колекторске површине од 4,35 m² по комаду и јединичне цене од 154 €/m² [9]. Укупна добијена енергија из колектора износи 19,158 GJ годишње што представља 10% од укупне захтеване потребне топлотне енергије. Укупни трошкови потребни за производњу топлотне енергије из комбинованог система су срачунати као сума неопходних трошкова за гас и трошкова за рад и одржавање система (R&O је 0,00392 €/kWh и 0,00111 €/kWh за гасни, односно соларни систем). Неопходни инвестициони трошкови за колекторе и трошкови за остатак соларног дела инсталације су приближно 80 10⁴ €. Такође, узета је ефикасност комбинованог система од 83%. У случају удела обновљивих извора енергије у производњи топлотне енергије за потребе санитарне топле воде, претпоставља се да је цена за произведену топлу воду умањена за 10%.

Тојлојтна енергија добијена сагоревањем биомасе
(Опција: биомаса)

Ова енергетска опција подразумева производњу топлотне енергије сагоревањем брикета од биомасе у котлу инсталисане снаге од 3 MW. У овом случају у прорачун

су узети следећи параметри: цена брикета од 0,09 €/kg, трошкови R&O су 0,00164 €/kWh, инвестициони трошкови од 70 €/kW, ефикасност котла од 75% и топлотна вредност биомасе од 13,9 MJ/kg. Укупна добијена топлотна енергија је 183,338 GJ годишње и укупна количина биомасе од 17.129,634 kg годишње. У случају удела биомасе у производњи топлотне енергије за потребе санитарне топле воде, претпоставља се да је цена за произведену топлу воду умањена за 40% [10, 11].

*Тојлојина енергија добијена из комбинованој сисџема
(Оиџија: гас + биомаса)*

Ова енергетска опџија се односи на комбиновани систем када сагоревање гаса узима учешће од 49%, а сагоревање биомсе од 51% у укупној производњи топлотне енергије. Количина топлоте која се са гасом унесе у котло је 101,389 GJ годишње и са биомасом од 120,912 GJ годишње. Укупна количина финалне енергије добијена из гаса је 90,236 GJ годишње, а из биомсе 93,102 GJ годишње. Укупна потребна количина гаса износи 2.982,039 m³ годишње и потрошња биомсе од 8.698,680 kg годишње. Такође, у прорачуну су узети следећи параметри: ефикасност комбинованог сисџема од 88% и смањена цена потрошне топле воде од 20%.

*Тојлојина енергија добијена из комбинованој сисџема
(Оиџија: гас + биомаса + соларна енергија)*

Ова енергетска опџија се односи на комбиновани систем када сагоревање гаса узима учешће од 39%, сагоревање биомсе 51% и соларна енергија од 10% у укупној производњи топлотне енергије. Укупна произведена енергија добијена из гаса, биомсе и соларних колектора је: 70,852 GJ годишње, 93,732 GJ годишње и 19,158 GJ годишње, респективно. Укупна потрошња гаса и биомсе је 2.341,451 m³ годишње, односно 8.757,545 kg годишње. У прорачуну су узети следећи параметри: ефикасност комбинованог сисџема од 88% и смањена цена топле воде за 20%.

Мерење одрживости енергетских опџија

Квалитет испитиваних енергетских опџија је дефинисан енергетским индикаторима одрживог развоја (ЕИОР) који су представљени преко скупова економских, социјалних и еколошких подиндикатора. Урађен је прорачун за следеће изабране подиндикаторе: *економске*: (а) цене енергије (EcIse), (б) инвестиција (EcInv), (в) ефикасности (EcIef), енергетског интензитета (EcIke); *социјалне*: (а) удео обновљивих извора енергије (SoIuoi), (б) удео трошкова у домаћинству за потрошну топлу воду (SoIutd), (в) број повреда на раду (I), по произведеној енергији (SoIbpr), (г) број радних сати (h) по произведеној енергији (SoIrs); *еколошке*: (а) емисија CO₂ по произведеној енергији (Eki_{CO₂}⁽¹⁾); (б) емисија CO₂ по становнику (Eki_{CO₂}⁽²⁾) (в) емисија NO_x по произведеној енергији (Eki_{NO_x}⁽¹⁾); (г) емисија NO_x по становнику (Eki_{NO_x}⁽²⁾) (табл. 1–3), [12, 13].

Таблица 1. Економски подиндикатори

Енергетске опције	EcIce [€/kWh]	EvInv [€/kWh]	EcIef [%]	EcIke [kWh/€]
Гас	0,0779	0,000262	90	0,00175
Гас + соларна енергија	0,0699	0,00103	83	0,00175
Биомаса	0,0263	0,00092	75	0,00175
Гас + биомаса	0,0537	0,00118	88	0,00175
Гас + соларна + биомаса	0,0472	0,00131	41	0,00175

Таблица 2. Социјални подиндикатори

Енергетске опције	SoIoi [kWh по домаћинству]	SoIutd [%]	SoIbpr [l/kWh годишње]	SoIrs [h/kWh]
Гас	0	1,35	3,927 10E-08	6,011 10E-05
Гас + соларна енергија	332,631	1,31	3,918 10E-08	5,997 10E-05
Биомаса	3183,21	0,80	3,927 10E-08	7,213 10E-05
Гас + биомаса	1616,48	1,08	3,927 10E-08	8,415 10E-05
Гас + соларна + биомаса	1960,05	1,06	3,918 10E-08	8,396 10E-05

Таблица 3. Еколошки подиндикатори

Енергетске опције	EkICO ₂ ⁽¹⁾ [kgCO ₂ /kWh]	EkICO ₂ ⁽²⁾ [kgCO ₂ по становнику]	EkINO _x ⁽¹⁾ [kgNO _x / kWh]	EkINO _x ⁽²⁾ [kgNO _x по становнику]
Гас	0,204	61,53	0,000499	0,151
Гас + соларна енергија	0,162	49,13	0,000447	0,135
Биомаса	0,231	69,94	0,000183	0,055
Гас + биомаса	0,218	65,80	0,000338	0,102
Гас + соларна + биомаса	0,196	59,54	0,000286	0,087

Да би се извршила процена одрживости предложених енергетских опција коришћен је метод вишекритеријалне анализе. Добијени резултати су се поредили преко општег индекса одрживости (ОИО) који представља меру комплексности енергетске опције. Да би се израчунао ОИО коришћен је математички модел који је базиран на синтезној техници фази скупова која се врло често примењује када се јављају неодређености у анализама комплексних система. У овом раду је коришћен

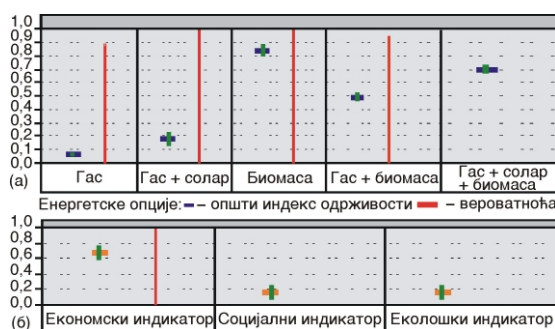
ASPID метод вишекритеријалне анализе који је заснован на стохастичким моделима неодређености. Предност ове методе у процесу доношења одлуке је могућност да ради са ненумеричким, неегзактним и непотпуним информацијама [14]. Тежински коефицијенти су означени за све индикаторе и они су у сагласности са испитиваним енергетским опцијама. Коефицијенти су пропорционални значају свих критеријума који су описани индикаторима и представљају њихову меру. У условима унапред утврђеног ограничења када је приоритет дат неком од тежинских коефицијената зависи листа приоритета испитиваних опција и квалитет њихове процене преко ОИО [15].

Анализа резултата

У овом раду је урађена и анализирана процена одрживости различитих комбинација технолошких опција за производњу топлотне енергије. Извршено је рангирање енергетских опција када је приоритет дат различитим аспектима одрживости односно различитим индикаторима. Приказане су листе приоритета за различите случајеве у условима унапред дефинисаног ограничења. Сlike 1–3 показују листе приоритета испитиваних опција када предност има економски, односно социјални и еколошки индикатор. Процес агломерације економских, социјалних и еколошких подиндикатора је урађен при дефинисаном услову 1 када је приоритет дат следећим подиндикаторима: EcI_{ce} , SoI_{uo} и $EkI_{CO_2}^{(1)}$. Ограничење 1 је дефинисано тако да је приоритет дат економском индикатору ($w = 0,68$) док социјални и еколошки индикатор имају исту вредност тежинског коефицијента ($w = 0,16$). У случају да економски индикатор има приоритет најбоље рангиране опције на листи приоритета су биомаса и гас + солар + биомаса (сл. 1). Енергетске опције гас и гас + солар се налазе у дну листе приоритета као најлошије процењене опције од пет испитиваних.

Ограничење 1. $EcInd(\text{услов } 1) > SoInd(\text{услов } 1) = EkInd(\text{услов } 1)$

$$EcInd(EcI_{ce} > EcI_{inv} = EcI_{ef} = EkI_{ke}) > SoInd(SoI_{uo} > SoI_{utd} = SoI_{bpr} = SoI_{rs}) = EkInd(EkI_{CO_2}^{(1)} > EkI_{CO_2}^{(2)} = EkI_{NO_x}^{(1)} EkI_{NO_x}^{(2)})$$



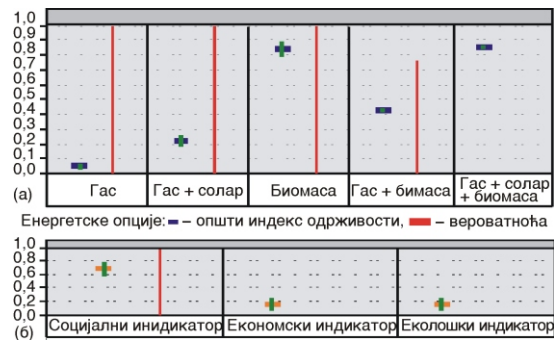
Слика 1. (а) Општи индекс одрживости енергетских опција када је приоритет дат економском индикатору; (б) тежински коефицијенти

Слика 2 показује ОИО за опције када се приоритет даје социјалном индикатору ($w = 0,68$) тако да економски и еколошки индикатори имају исте вредности тежинских коефицијената ($w = 0,16$). Према ОИО енергетске опције биомаса и гас +

+ солар + биомаса имају исти ниво одрживости. Оне су најбоље рангиране опције док су опције гас и гас + солар у дну листе приоритета као у претходном случају.

Ограничење 2. $SoInd$ (услов 1) > $EcInd$ (услов 1) = $EkInd$ (услов 1)
 $SoInd$ ($SoIuo1 > SoIutd = SoIbpr = SoIrs$) > $EcInd$ ($EcIce > EcIinv = EcIef =$
 $= EkIke$) = $EkInd$ ($EkI_{CO_2}^{(1)} > EkI_{CO_2}^{(2)} = EkI_{NO_x}^{(1)} = EkI_{NO_x}^{(2)}$)

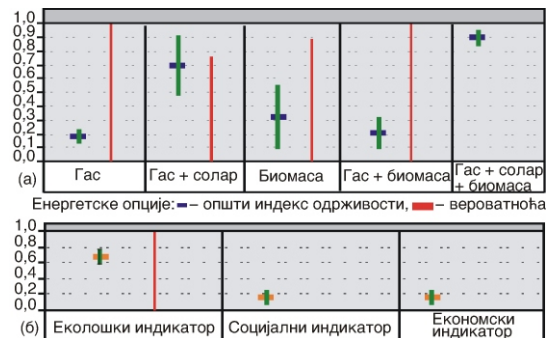
Слика 2. (а) Општи индекс одрживости енергетских опција када је приоритет дат социјалном индикатору; (б) тежински коефицијенти



Код следећег случаја, при дефинисаном ограничењу 3, предност има еколошки индикатор ($w = 0,68$) док социјални и економски индикатори имају исту вредност тежинског коефицијента ($w = 0,16$), сл. 3. Примећује се да када еколошки индикатор има приоритет, опције гас + солар + биомаса и гас + солар показују најбољи ниво одрживости. Енергетска опција биомаса која је била у врху листе код претходног случаја, код овог случаја је у групи енергетских опција која је лоше процењена у смислу одрживости.

Ограничење 3. $EkInd$ (услов 1) > $SoInd$ (услов 1) = $EcInd$ (услов 1)
 $EkInd$ ($EkI_{CO_2}^{(1)} > EkI_{CO_2}^{(2)} = EkI_{NO_x}^{(1)} = EkI_{NO_x}^{(2)}$) >
 $SoInd$ ($SoIuo1 > SoIutd = SoIbpr = SoIrs$) = $EcInd$ ($EcIce > EcIinv = EcIef = EkIke$)

Слика 3. (а) Општи индекс одрживости енергетских опција када је приоритет дат еколошком индикатору; (б) тежински коефицијенти



Закључак

У овом раду је извршена процена одрживости различитих енергетских система. Опције представљају различите енергетске технологије за производњу

потрошне топле воде у домаћинствима. Као могућности замене коришћења фосилних горива узете су у разматрање енергетске опције коришћења биомасе и соларне енергије. Свака опција је дефинисана основним скупом енергетских индикатора у односу на различите аспекте одрживог развоја. Коришћен је ASPID метод вишекритеријалне анализе да би се добио општи индекс одрживости који представља квалитет одређене енергетске опције у смислу одрживости. Урађена је математичка и графичка синтеза свих индикатора и испитан је међусобни утицај свих тежинских коефицијената према различитим аспектима одрживог развоја када се приоритет даје једном од критеријума. Анализирано је неколико случајева где сваки случај представља једно ограничење. У зависности од постављеног ограничења добијене су различите листе приоритета опција. Тако, за прва два представљена случаја енергетске опције: биомаса и гас + солар + биомаса показују висок ниво одрживости.

Овај рад представља могућност организованог коришћења обновљивих извора енергије (соларне и биомасе) у производњи топлотне енергије и поређење ових енергетских опција са класичним опцијама у циљу постизања услова потребних за одрживи развој што подразумева уштеде услед коришћења комбинованих система за производњу топлотне енергије за добијање потрошне топле воде смањивањем емисије CO₂ и заштиту животне средине.

Литература

- [1] ***, Key World Energy Statistics, IEA, 2007.
- [2] ***, Стратегија развоја енергетике Републике Србије, Извештај, Министарство рударства и енергетике, Београд, Србија, 2004
- [3] <http://www/seea.sr.rs>
- [4] <http://www.vaillant.rs>
- [5] ***, Electric Power Annual, EIA, The Office of Coal, Nuclear, Electric and Alternate Fuels Master, 2004
- [6] ***, Public Enterprise „Srbijagas”, <http://www/srbijagas.com>
- [7] Eurostat Statistical Year Books, <http://www/epp.eurostat.ec.europa.eu>
- [8] TRNSYS, 2006, Trnsys, a Transient System Simulation Program, Users Guide, Version 16, Solar Energy Lab., University of Wisconsin-Madison, Wis., USA
- [9] <http://www/apricus.com>
- [10] Дакић, Д., Ерић, А., Једна од могућности коришћења пољопривредне биомасе као горива, *ПТЕП, Часопис за процесну технику и енергетску технологију у пољопривреди*, 13 (2009), 1, 81–84
- [11] <http://seeenergy.blogspot.com/2006/11biomasa.html>
- [12] ***, IAEA, United Nations Department of Economic and Social Affairs, International Energy Agency, Eurostat and European Environment Agency, Energy Indicators for Sustainable Development, Guidelines and Methodologies, printed by the IAEA in Austria, 2005
- [13] Afgan, N., Carvalho, G. M., Sustainable Assessment Method for Energy Systems, Kluwer Academic Publisher, Boston, Mass., USA, 2000
- [14] Hovanov, N., Analysis and Synthesis of Parameters under Information Deficiency, St. Petersburg State University Press, USSR, 1996
- [15] Jovanović, M., An Analytical Method for the Measurement of Energy Systems Sustainability in Urban Areas, *FME Transactions*, 36 (2008), 4, 157-166

Abstract

**Sustainability Estimation of Energy System
Options Which Use Gas and Renewable
Resources for Sanitary Hot Water Production**

by

*Marina P. JOVANOVIĆ**, *Valentina M. TURANJANIN,*
Biljana S. VUČIĆEVIĆ, Milada L. PEZO, and Vukman V. BAKIĆ

**Laboratory for Thermal Engineering and Energy,
Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia**

One of the possibilities for fossil fuel substitution is the biomass and solar energy using for heat production. This paper presents evaluation of various energy system options for the purposes of hot water production in heating plant. It produces and delivers heat energy for heating and domestic hot water to customers (approximately of 17000 households). It is assigned a several possibilities that include using renewable energy instead of fossil fuel for thermal energy produces in sanitary hot water production. So, in this paper sustainability evaluation of different energy options for few cases in regard to thermal energy obtained are shown: (1) thermal energy from the gas combustion, (2) thermal energy from the gas combustion and solar collection, (3) thermal energy from the biomass combustion, (4) thermal energy from the gas and biomass combustion, and (5) thermal energy from the gas and biomass combustion and solar collection. Obtained results are compared by General Index of Sustainability which is the measure of system complexity.

Key words: renewable energy, heat production, general index of sustainability

*Corresponding author; e-mail: marinaj@vinca.rs

Рад примљен: 20. фебруара 2010.
Рад прихваћен: 8. марта 2010.