

**10.16. СТУДИЈА НА СЛУЧАЈ 1: РЕЦИКЛИРАЊЕ И ОБНОВУВАЊЕ НА ЕНЕРГИЈАТА ОД
ОТПАДНИ ПОЛИМЕРНИ КОМПОЗИТИ
CASE STUDY 1: RECYCLING AND RECOVERY OF ENERGY FROM WASTE POLIMER
COMPOSITES**

Винета Сребренкоска

Универзитет „Гоце Делчев“, Технолошко-технички факултет, Штип, Република Македонија

Димко Димески

Универзитет „Гоце Делчев“, Технолошко-технички факултет, Штип, Република Македонија

Дијана Цапеска Богатиноска

11 Октомври „Еурокомполит“, Прилеп, Р. Македонија

10.17.1. Вовед

Introduction

Во овој дел се презентирани можностите за рециклирање и за обновување на енергијата од отпадни полимерни композитни материјали. Истражувањата што се презентирани во овој материјал се направени од одреден број компании кои главно се занимаваат со производство на производи од зајакнати полимерни композитни материјали и компании кои се занимаваат со третирање на овие материјали на крајот од нивниот животен век. Производителите на полимерни композитни материјали имаат притисок од нивните купувачи да го земат предвид влијанието на нивните крајни производи врз околината, а исто така, од нив бараат соодветни решенија за третирање на овој вид отпад. Во рамките на оваа студија ќе бидат прикажани можностите за рециклирање на ваков тип материјал и за обновување на енергијата, врз основа на економска анализа и анализа на животната средина, а истовремено ќе биде прикажана и споредбата меѓу различните постапки.

Редоследот на работните задачи во рамките на оваа студија на случај (case study) е даден на сликата 10.17.1. Истражувањето почнува со попис на најважните фактори (барања) кои влијаат на начинот на справување со отпадот на крајот од животниот век на производитите и третирање на отпадот кој содржи композитни материјали. Всушност, тоа се еколошки барања во форма на прописи, текови на отпад, техники за рециклирање на материјалот, обновување на енергијата од отпадниот материјал и методи за анализа на трошоците и ефектот врз животната средина. Техниките за третман на отпадот се ограничени на рециклирање на материјалот и обновување на енергијата, а депонијата не се препорачува како опција од моментот кога овој метод е забранет како запалив и органски отпад. Во следната фаза се направени истражувањата и експериментите во рамките на неколку студии на случаи (case studies). Студиите на случаи се поделени во пет групи во зависност од вклучените материјали, а анализата на трошоците и ефектот врз животната средина треба да бидат земени предвид паралелно со нив. Влијанието на ефектите врз животната средина е направено врз основа на проценувањето на животниот циклус (Life Cycle Assessment - LCA), според стандардот ISO14040 (http://www.pqm-online.com/assets/files/standards/iso_14040-2006.pdf, 2006).

Во оваа студија на случајот се вклучени следниве пет типа на полимерни композитни материјали:

1) Зајакната пластика со јаглородни влакна (CFRP)

Јаглородните влакна се користат во структури со високи барања за цврстина и крутост и најчесто се комбинираат со полимерна матрица и тоа епоксидна или винилестерска смола. Композитите со јаглородни влакна се користат во авионската, воената индустрија, за спортски реквизити и др.

2) Зајакнати полимери (FRP) – сендвич структури со јадро од PVC материјал

Овој материјал претставува сендвич конструкција која се состои од две надворешни површини кои во средината имаат јадро од друг материјал. Како резултат на ваквата комбинација на материјали се добива структура со висока јакост при свиткување. Во рамките на оваа студија е користен вмрежен поливинил хлорид (PVC) како јадро. Надворешниот материјал е направен од полимерен композитен материјал врз основа на полиестерска или винилестерска матрица зајакната со јаглородни или со стаклени влакна. Ваквата сендвич структура се користи за производство на јахти, големи бродови, контејнери и друго.

3) Термореактивни композити со стаклени влакна – ленти за пресување (SMC препрег)

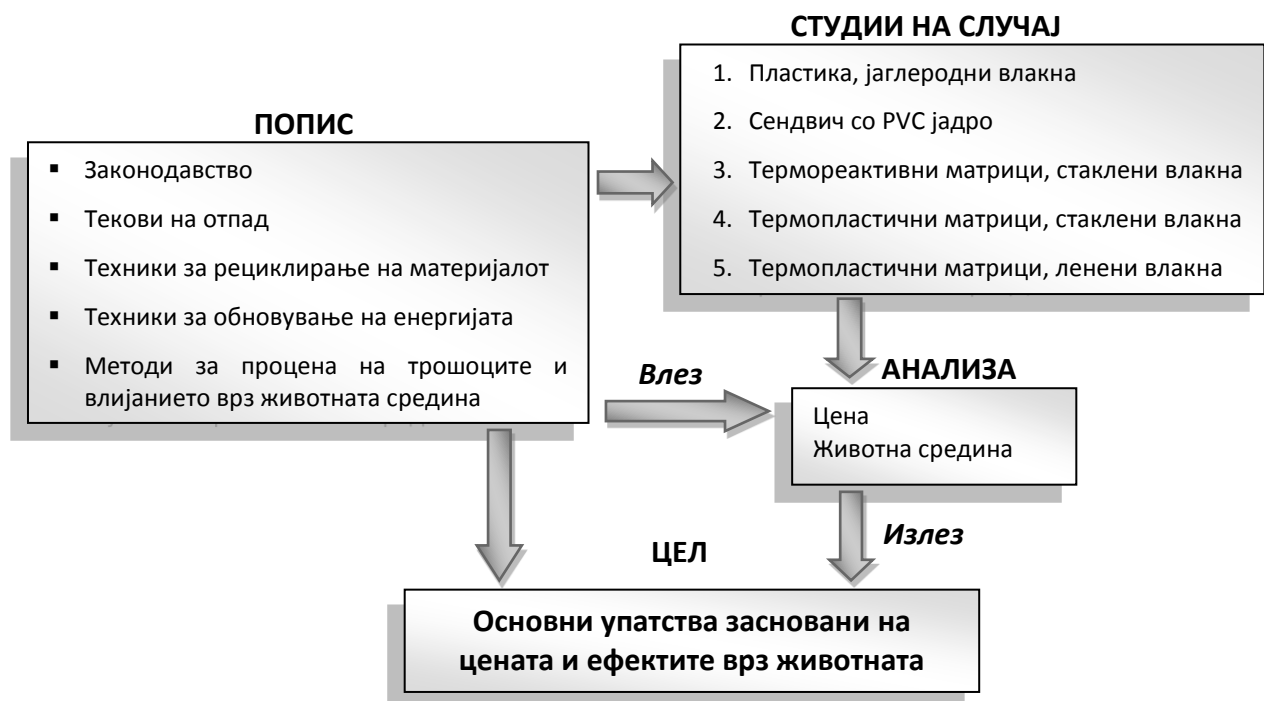
Лентите за пресување претставуваат термореактивен полимерен композитен материјал. Името на овој композитен материјал потекнува од применетата термореактивна матрица и од начинот на производство. Имено, зајакнувачките стаклени влакна се импрегнираат со термореактивна полиестерска смола и додатоци. На тој начин се формира предформа т.н. препрег, кој всушност, претставува лента за пресување, а под влијание на притисок и температура истата се обликува во апликативен композитен материјал. Од овој вид материјал се изработуваат каросерии за возила, електрични компоненти за електроиндустрија и др.

4) Термопластични композити зајакнати со стаклен мат (GMT)

Кај овој композитен материјал кратките стаклени влакна, кои се во форма на стаклен мат со континуирана должина, претставуваат зајакнувачка фаза, а термопластичен полимер, како на пример, полипропиленот претставува полимерна матрица. Најчесто се користи за изработка на внатрешни делови за возила и др.

5) Термопластичен композит со природни влакна како полипропилен/лен (PP/Flax)

Овој композит е врз основа на полипропилен зајакнат со природни ленени влакна. Овој материјал се користи за производство на внатрешни делови за возила или за друга апликација каде што не се бара висока издржливост на структурата.



Слика 10.17.1. Краток опис на студијата на случај
Figure 10.17.1. Short description of case study

10.16.2. Резултати од пописот и студиите на случаи

Results of the inventory and case studies

Направен е преглед на важните фактори кои се однесуваат на можноста за отстранување на отпадот.

а) Законодавство

Законите и регулативите, кои влијаат на сите активности при третирањето на отпадот, претставуваат една од најважните содржини. Во врска со тоа, направено е истражување и собирање на еколошките барања во националната законска регулатива и законската регулатива на Европската унија, што го вклучува постојното законодавство и очекуваното идно законодавство (EU, 2003). Тоа, исто така, ја вклучува и законската регулатива која се однесува на работната средина. Според правилата што се однесуваат на законските регулативи и надворешната околина, добиени се следниве заклучоци кои се однесуваат на полимерните композитни материјали:

- Од јануари 2002 па наваму, отпадот од полимерни композити се смета за пластичен отпад бидејќи најголем дел од композитот се состои од пластика.
- Можностите за обновување на енергијата зависат од прописите на секоја постројка за согорување и нејзините капацитети.
- За транспорт на композитниот отпад низ државите од Европската унија е неопходна дозвола бидејќи полимерните композити не се на зелената листа.

Што се однесува до прописите за работната средина, главните промени што се очекуваат во врска со композитните материјали се следните:

- Се очекуваат строги правила за изоцијанидите, кои се однесуваат на високите температури во работната средина и на создавањето прашина и влакна.
- Ревизија на прописите за терморективните материјали.

Бидејќи не постои регулатива за ракување со ленени влакна, се препорачува употреба на правилата кои важат за ракување со памук. На пазарот е зголемен асортиманот на нови видови влакна, како што се нановлакната и респирабилните јаглородни влакна. Многу е важно да се контактира релевантна експертиза бидејќи ризикот поврзан со работата со овие видови влакна е малку познат.

б) Текови на отпад

Истражувањата за тековите на отпадот вклучуваат процена на два вида количества композитни отпадни текови, еден е текот од крајот на животниот циклус на производите, а другиот е текот на отпад кој се создава во процесот на производство.

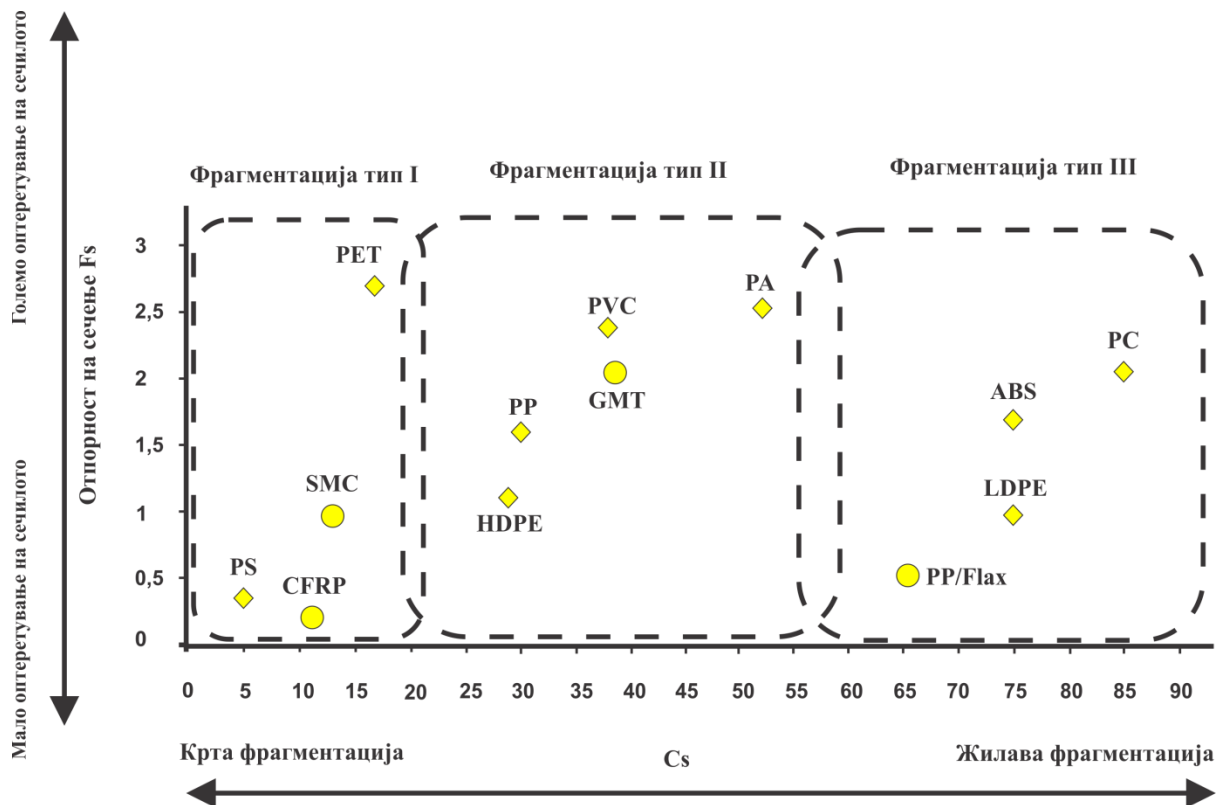
в) Истражувања за рециклирање на материјалот

Направен е преглед на постојните методи за рециклирање на материјалите и резултатите сè дека постојат голем број методи. Механичкото рециклирање на материјалот е одбрано како најсоодветен метод во однос на параметрите како што се текот на отпадот, економијата, можноста за обработка и примената.

Процесот на дробење во гранулатор со ножеви за сечење претходно е истражуван и добро документиран за полимерните материјали и FRP - композитите (Simmons, 1999; Schmidt, Handels, 2004). Развиена е шема за оптимизација на процесот на дробење, видете ја сликата 10.17.2. Материјалите кои се предмет на истражување, SMC, CFRP, GMT, PP/Flax се групирани според три типа фрагментација. На x-оската од лево на десно се прикажани: тип I – крт, тип II – меѓу крт и жилав, тип III – жилав. Типот на фрагментација се одредува преку „бројот на кртоста“ (C_s), определен со жилавоста на материјалот. Y-оската го претставува оптоварувањето на сечилото, кое се движи од мало до големо, а е претставено преку отпорноста на сечење (F_s). Процесот на сечење дава влезна информација за анализата на трошоците и животната средина. Оваа информација е потрошувачката на енергија (табела 10.17.1).

По операцијата на дробење, материјалот се одвојува од прашината со циклон. Материјалот понатаму може да се класифицира со сеење низ сито. Ова резултира во повисок квалитет на материјалот, но ги зголемува трошоците. За да бидат трошоците пониски, потребно е

процесите на идно вклучување во производство да бидат без класифицирање на материјалот со просејување по дробењето.



Слика 10.17.2. Дијаграм за карактеризирање полимерни материјали и полимерни композити за гранулација со дробење

Figure 10.17.2. Diagram for characterising polymer materials and polymer composites for granulation through grinding (Simmons, 1999)

Табела 10.17.1. Потрошувачка на енергија при дробење на композитните материјали
Table 10.17.1. Energy consumption for grinding of composite materials

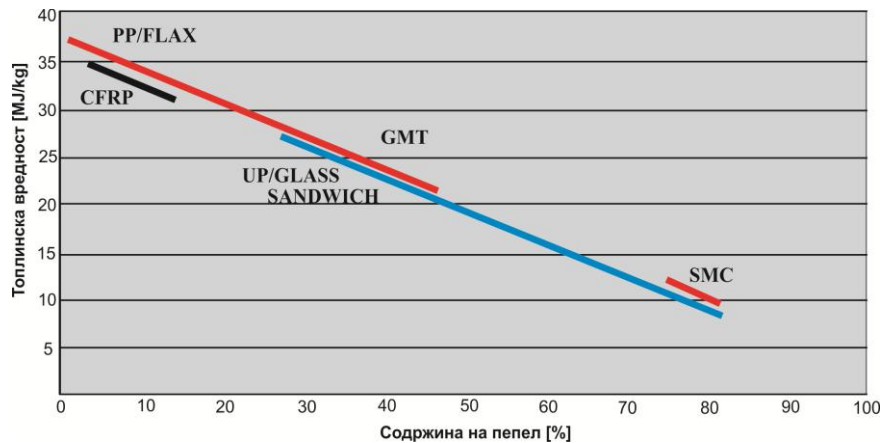
Материјал	Потрошувачка на енергија [kWh/kg]
CFRP	0.074
FRP – сендвич	0.087
SMC	0.044
GMT	0.039
PP/Flax	0.048

г) Истражувања за обновување на енергијата

За да се овозможи идно добивање енергија преку спалување на отпадот од полимерните композити, неопходно е да се направат тестирања за овој вид отпад. За таа цел, на секој од материјалите кои се разгледувани во оваа студија на случај, се направени соодветни испитувања, со цел да се добие точна информација за можностите за спалување:

- анализа на елементарниот состав, топлинската вредност, содржината на пепел, итн.
- анализа на диоксин, тетрахлордибензодиоксин (TCDD),
- карактеристични својства на согорување,
- тестови од голем размер во постројките за спалување на отпадот.

Производителите на отпадот мора да му дадат информација за точната содржина на испорачаниот материјал на купувачот, односно спалувачот на отпад, заради барањата за дозволени емисии. Според тоа, истражувани се елементарниот состав, топлинската вредност и содржината на пепел. Резултатите покажале дека е можно користењето на композитите како гориво. Топлинската вредност варираше од 9 до 35 MJ/kg, а на сликата 10.17.3 е дадена топлинската вредност во функција од содржината на пепел. Топлинската вредност зависи од типот на композитот и количеството на влакна и додатоци (Henshaw et al., 1996). Ниската вредност на SMC материјалот е објаснета со високата содржина на стаклени влакна.



Слика 10.17.3. Топлинската вредност во функција од содржината на пепел за композитните материјали кои се предмет на истражување

Figure 10.17.3. Heat value as function of ash content for the investigated composite materials (Henshaw et al., 1996)

Анализите покажале дека јадрото во сендвич материјалот има високи вредности за диоксин. Овој материјал содржи високи вредности на хлор (Cl), што се гледа од основната анализа. За овој вид материјал е важно да се прикаже содржината на хлор, со цел во постројката за спалување да се направи проценка дали опремата за прочистување на штетните гасови може да се справи со зголемената количина хлор и да се одржи дозволениот праг (максимално дозволена вредност) на диоксин. Секоја постројка за согорување има дозволени емисии во зависност од типот на отпадот што ѝ е дозволено да го третира. Овде мора да се спомене дека тешките метали дејствуваат како катализатори во создавањето на диоксинот, при што бакарот (Cu) има најлошо влијание.

Карактеризацијата на композитите како гориво вклучува и тест на реактивност и споредба со познатите горива, како што се јагленот и био горивото. Добиени се интересни резултати од тестирањата кои покажале дека термопластичните композити, PP/лен, имаат сличности со био горивата, а композитите со карбонски влакна, CFRP, покажале сличности со јагленот во однос на својствата како што се: густината, количеството на пепел и брзината на согорување (Cuncliffe et al., 2003; De Marco et al., 1997; Simmons, 1999). Со проучување на параметрите била истакната важноста на температурата, нивото на кислород и маса во однос на брзината на согорување. Нивото на кислород и температурата биле назначени како важни параметри особено за CFRP, што треба да биде анализирано внимателно со цел да се избегнат неизгорените влакна и пепелта. Како особено значаен проблем се покажало согорувањето на композитите со стаклени влакна во постројките за согорување кои содржат флуидизирана подлога. При температура на спалување поголема од точката на топење на стаклото (840-850 °C), стаклото се топи и се слепува, што предизвикува дефлуидизирање на подлогата и влошување на постапката на согорување. Флуидизираната подлога потоа мора да се обнови заради намалената функција.

Со цел да се направи тест во поголеми големи размери, 13 тони од мешан композитен отпад бил собран и спален во период од два дена. Пред спалувањето била направена смеса за горење со мешање на 10% од композитниот отпад со комунален отпад. Анализите на гасот биле прекинати поради дефект на филтерот и затоа тестот дал неверодостојни резултати. Меѓутоа, значењето на намалувањето на големината на отпадот пред согорување било идентификувано преку проучувањето на пепелта. Биле пронајдени парчиња несогорени композитни материјали. Според раководителот во постројката не биле забележани никакви проблеми, иако подготовката пред спалувањето и самото дробење барале повеќе напор отколку подготовката на комуналниот отпад (Cunliffe et al., 2003).

При обновување на енергијата, комплетното спалување би резултирало со ниски емисии. За да се постигне ова за композитните материјали, активностите кои подразбираат сечење/кинење и раслојување, се од особено значење. За композитите со јаглородни влакна ова е од уште поголемо значење во комбинација со високата температура на горење и со доброто снабдување со кислород.

г) Комбинација од рециклирање на материјал и обновување на енергијата

Во рамките на оваа студија вклучен е и метод на флуидизирана подлога во кој е комбинирано рециклирањето на материјалите со обновување на енергијата. Во термичкиот процес основниот материјал е трансформиран на хемиски компоненти кои се употребени за производство на енергија, а јаглородните влакна се рециклираат. Овој метод е истражуван и за материјали со стаклени влакна и за материјали со јаглородни влакна (Pickering et al., 2000).

Во оваа студија, отпадот (препрег со јаглородни влакна) добиен при производството на авиони, бил тестиран во флуидизирана подлога. Јаглородните влакна се скап материјал и со помош на овој метод се овозможува да се зачува поголема должината на влакната во споредба со механичкото рециклирање. Според тоа, добиени се повисоки вредности и во поглед на цврстината во новата апликација и од економски аспект. Резултатите од тестирањето на јаглородните влакна покажале опаѓање на механичките својства во споредба со основниот материјал, но со оптимизација на флуидизираната подлога во однос на температурата и процесот, механичките својства можат да се подобрат.

д) Работна околина

Во рамките на студијата на случај за различните типови материјали било испитувано влијанието на применетите процеси врз работната околина, при што било следено создавањето честици и бучава (Astrom et al., 2004). Овие ставки се многу важни особено за механичките третмани како што се сечењето, кинењето и дробењето. Резултатите од мерењето на бучавата за време на дробењето генерално даваат високи вредности за сите материјали, што е над дозволениот праг. Измерената вкупна вредност за честици била обично под 0.1 mg/m^3 , што е многу ниска вредност со оглед на тоа дека прагот за термореактивните композити е 3 mg/m^3 . Сепак, се препорачува користење лична заштита и од честиците и од бучавата при работа со машините. Други предложени мерки се подесување на гранулаторот да генерира помала бучава. При сечењето на големи сендвич структури со специјална машина, било мерено генерирањето честици. Како резултат од ова мерење, добиена е вредност која била половина од дозволениот праг за термореактивните материјали.

10.16.3. Формирање препораки за рециклирање на материјалите и за обновување на енергијата

Forming recommendations for material recycling and energy recovery

Врз основа на анализите и истражувањата направени се соодветни препораки (сценарија) за третман на анализираните материјали кои ги вклучуваат сите активности неопходни за рециклирање на материјалите и за обновување на енергијата.

А. Препораки за зајакната пластика со јаглородни влакна (CFRP)

- Механичко рециклирање на отпадот - недовмрежен препрег кој би можел да се користи за производство на мат од кратки јаглородни влакна и/или за процесите на екструзија и пултрузија.
- Механичко рециклирање на отпадот - вмрежен препрег кој би можел да се користи при процесите на екструзија и пултрузија.
- Спалување на отпадот (вмрежен и недовмрежен препрег) за обновување на енергијата.
- Рециклирање на материјалот и обновување на енергијата преку методот со флуидизирана подлога на крајот на животниот циклус на производите.

B. Препораки за зајакнати полимери (FRP) – сендвич структури со јадро од PVC материјал

- Механичко рециклирање на отпадот - создаден при производство на јадрото, кој би можел да се користи во процесите на компресија.
- Механичко рециклирање на отпадот - создаден при производство на јадрото, кој би можел да се користи за екструдирање.
- Спалување на отпадот - создаден при производство на јадрото за обновување на енергијата.
- Спалување на отпадот создаден на крајот на животниот циклус на производите за обновување на енергијата.

C. Препораки за термореактивни композити со стаклени влакна – ленти за пресување (препрег) (SMC)

- Механичко рециклирање на отпадот добиен при производниот процес кој би можел да се користи во процесите на екструзија, компресивно обликување, каде што би ги заменил полнителот или кратките влакна.
- Спалување на производниот отпад за обновување на енергијата, кој може да го замени јагленот.

D. Препораки за термопластични композити зајакнати со стаклен мат (GMT)

- Механичко рециклирање на отпадот добиен при производниот процес, кој би можел да се користи за екструдирање или компресивно обликување и може да биде замена за полипропилен (PP) или за оригиналниот композит (GMT).
- Спалување на производниот отпад за обновување на енергијата, и може да биде замена за јагленот.
- Производство на пелети од отпад добиен при производниот процес кои можат да се користат за согорување и можат да го заменат јагленот.

E. Препораки за термопластичен композит со природни влакна како полипропилен/лен (PP/Flax)

- Механичко рециклирање на отпадот добиен при производниот процес, кој би можел да се користи за екструдирање или компресивно обликување и може да биде замена за полипропилен (PP).
- Спалување на производниот отпад за обновување на енергијата, кој може да биде замена за јагленот.
- Производство на пелети од отпад добиен при производниот процес кои можат да се користат за согорување и можат да го заменат јагленот.

10.16.4. Оценување на влијанието врз животната средина
Assessment of the environmental impact

Оценката за влијанието врз животната средина е направена преку собирање на сите податоци за емисиите и трошоците, а тоа се:

- Емисиите од производството на јаглеродните влакна;
- Трошоците за механичка обработка – мелење;
- Количеството на гориво кое може да биде заменето со согорување на полимерните композитни материјали;
- Емисиите од согорување на композитните материјали;
- Депонирање на пепелот од согорувањето.

Влијанието врз животната средина при производството на јаглеродни влакна се базира на информациите за потрошувачката на енергија за време на производниот процес. Вкупно 400 MJ се трошат за производство на 1 kg јаглеродни влакна (Callister, 2001).

Во табелата 10.17.2 се презентирани изворите и количеството енергија и емисијата на гасови при производство на јаглеродни влакна. Податоците за емисиите и влијанието врз животната средина се добиваат од EPS (Environmental Priority Strategies) 2000 базата на податоци (http://msl1.mit.edu/esd123_2001/pdfs/EPS2000.PDF, 2000). Постојат повеќе ефективни методи што се користат за анализа на животниот циклус, од кои една е EPS која ги исполнува барањата на ISO 14040. Методот се базира на пресметки на влијанија од различните фази: производство, употреба, рециклирање, и секоја фаза е поделена на голем број одделни активности на кои им се доделува вредност на влијание врз животната средина во согласност со следната релација за пресметка:

$$\text{Оптоварување на животната средина} = \text{индекс на оптоварување на животната средина} \times \text{количество}$$

Оптоварувањето на животната средина е изразено во ELU (Environmental Load Unit) единица за влијание врз животната средина. Таа претставува нумеричка вредност која одговара на степенот на оптоварување на животната средина, односно поединечните активности се сметаат за причина, на пример, употребата на одредена суровина или консумирање специфични извори на енергија.

Табела 10.17.2. Емисии и влијание врз животната средина при производство на јаглеродни влакна

Table 10.17.2. Emissions and environmental impact during production of carbon fibers

Извор на енергија	Количина [MJ]	CO ₂ [kg]	NO _x [kg]	SO _x [kg]	Влијание врз животната средина [ELU]
Електрична енергија	200	26,8	0,06	0,1398	7,8
Нафта	200	39,8	0,0363	0,0302	12,0
Вкупно	400	66,6	0,0963	0,17	19,8

За вреднување на обновената енергија добиена со согорување на различни композитни материјали, направена е нејзина споредба со замена на две алтернативни горива. Првата алтернатива е јаглен, кој најчесто се користи како дополнително гориво во текот на зимскиот период во постројките за согорување, а втората алтернатива е собран отпад за горење. Топлотната вредност на собраниот отпад се претпоставува дека е иста како и за огревно дрво, бидејќи содржи големо количество дрво. Во табелата 10.17.3 се дадени топлотните вредности за композитни материјали во корелација со количеството на заменетите алтернативни горива.

Табела 10.17.3. Топлотна вредност и количество на заменето гориво

Table 10.17.3. Heating value and amount of fuel replaced

Материјал	Топлотна вредност [MJ/kg]	Количество на заменет јаглен [kg]	Количество на заменет собран отпад за горење [kg]
Јаглен (заменет)	27,2		
Отпад за горење (заменет)	16,8		1,89
CFRP	31,7	1,16	1,25
GRP-сендвич структура	21,0	0,77	1,49
PVC-јадро	25,0	0,92	0,45
SMC	7,5	0,27	1,50
GMT	25,2	0,93	2,02
PP/Flax	34,0	1,25	
Дрвени пелети	20,0		

Емисиите на CO₂, NO_x и SO_x при согорување на композитниот материјал се проценуваат со метод врз основа на елементарниот состав на секој композитни материјали (Steen, 1999). Од EPS 2000 базата на податоци се добиени следниве податоци за влијанието на емисиите врз животната средина:

- 1 kg CO₂ резултира во 0,108 ELU,
- 1 kg NO_x резултира во 2.13 ELU,
- 1 kg SO_x резултира во 3,27 ELU.

Формираниот пепел при согорувањето на полимерниот композитен материјал се депонира, а тоа исто така, влијае врз животната средина. Влијанието на депонијата врз животната средина се оценува врз основа на пресметките на стагнација на животот на одредена површина, шума. Влијанието врз животната средина за користење на шумите е 0,0455 ELU/m² x година (Steen, 2002). Во табелата 10.17.4 е дадена содржината на пепел што се создава при согорувањето на различни композитни отпадни материјали и влијанието врз животната средина.

Табела 10.17.4. Влијане на депониите со пепел врз животната средина
Table 10.17.4. Effect of the ash landfill on the environment

Материјал	Количество на пепел [%]	Влијание на депонијата врз животната средина [ELU]
CFRP	9,65	2,19E-5
GRP - сендвич структура	31,6	1,00E-4
PVC - јадро	0,5	1,14E-6
SMC	72,6	2,00E-4
GMT	38,9	1,00E-4
PP/Flax	1,3	2,95E-6

10.16.5. Литература References

International standard ISO 14040, Second edition 2006-07-01.

http://www.pqm-online.com/assets/files/standards/iso_14040-2006.pdf, Посетено на 10.12.2010.

Hedlund Astrom A, Luttrupp C (2004) Conditions for recycling and recovery of composite materials. Proceedings from the 11th International CIRP Life Cycle Engineering Seminar, 2004, Belgrade, Serbia.

Pickering S J et al. (2000) A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites. Compos Sci Technol 60: 509-523.

Baumann H, Boons F, Bragd A (2002) Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspective. *J Clean Prod* 10: 409-425.

William D Callister (2001) *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, New York.

A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics. http://msl1.mit.edu/esd123_2001/pdfs/EPS2000.PDF, Посетено на 31.12.2011.

Cunliffe A M, Jones N, Williams P T (2003) Pyrolysis of Composite Plastic Waste. *Environ Technol* 24: 653-663.

European Environment Agency EEA (1999) "Environment in the European Union at the turn of the century", Summary, ISBN 92-828-6775-7.

European Communities EU (2001) "Environment 2010: Our Future, Our Choice", 6th EU Environment Action Programme 2001-2010, ISBN 92-894-0261-X.

European Communities EU (2003) "Handbook for Implementation of EU Environmental Legislation", Section 4, Waste Management Legislation, <http://europa.eu.int/comm/environment/enlarg/handbook/handbook.htm>. Accessed 15 Dec 2010.

Simmons J (1999) Recycling thermoset composites. *Reinforced plastics* 43: 64-65.

Schmidt S, Handels B (2004) Eco efficiency of SMC parts. 4th Automotive Seminar – New Challenges in Automotive, 10-11 February, 2004, Bremen, Germany.

Cuncliffe A M, Williams P T (2003) Characterisation of products from the recycling of glass fibre reinforced polyester waste by pyrolysis. *Fuel* 82: 2223-2230.

De Marco I et al. (1997) Recycling of the Products Obtained in the Pyrolysis of Fibre-Glass Polyester SMC. *J Chem Tech Biotechnol* 69: 187-192.

Henshaw J M, Han W, Owens A D (1996) An Overview of Recycling Issues for Composite Materials. *J Thermoplas Compos* 9: 5-20.