

Mogućnosti reciklaže kompozitnih materijala

Marina Stamenović¹, Jelena Petrović²,
Ivana Dimić², Slaviša Putić²

Pregledni rad
UDC:351.777.61.004.8

UVOD

Kompozitni materijali imaju široku primenu u raznim granama industrije, kao što su automobilska, avioindustrija i druge. Uopšteno govoreći, postoje tri vrste kompozitnih materijala u zavisnosti od vrste matrice, koji su u širokoj upotrebi, to su kompoziti sa polimernom matricom (PMC), kompoziti sa metalnom matricom (MMC) i kompoziti sa keramičkom matricom (CMC). U zavisnosti od vrste ojačanja, mogu se podeliti na: kompozite sa ojačanjem u obliku čestica, kompozite sa ojačanjem u obliku vlakana i strukturne kompozite (laminati). Kompoziti sa polimernom matricom dominiraju na tržištu, od kojih su najčešći oni sa termostabilnom polimernom matricom, mada se poslednjih godina povećala upotreba kompozita sa termoplastičnim polimernim matricama [1]. Iz tog razloga će u ovom radu biti predstavljene mogućnosti i postupci reciklaže kompozita sa termoplastičnom i termostabilnom polimernom matricom.

Industrije u kojima se najviše primenjuju kompoziti su avioindustrija (preko 20%) i automobilska industrija (preko 30%). Danas većina borbenih aviona u svom sastavu sadrži preko 50% mase kompozita. Mala težina kompozita u odnosu na zapreminu je najbitnija osobina za njihovu primenu u automobilskoj industriji, jer se samim tim povećava efikasnost potrošnje goriva. U automobilskoj industriji kompoziti se koriste za izradu enterijera, šasije, haube, električnih komponenata itd. Takođe, kompoziti se koriste i u proizvodnji čamaca u brodogradnji i za izradu turbina.

Reciklaža doprinosi održivom razvoju inženjerskih materijala. Danas se materijali kao što su metal, staklo, plastika recikliraju u velikoj meri, dok se kompozitni materijali još uvek ne recikliraju adekvatno. Razlog je njihova heterogena struktura, pa je postupak reciklaže složen i otežan, a dobijeni reciklati nezadovoljavajućeg kvaliteta, posebno je to slučaj kod kompozita sa termostabilnom polimernom matricom [2].

Adrese autora: ¹Visoka škola strukovnih studija Beogradska politehnika, Beograd, ²Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Rad primljen: 24. 05. 2013.

Trenutno dostupni reciklažni postupci za reciklažu kompozitnih materijala imaju niz tehnoloških i ekonomskih ograničenja. Osnovni problem kod reciklaže kompozita je oslobađanje homogenih čestica (čistih materijala) iz kompozita. Reciklaža kompozita je otežana kako prisustvom ojačanja tako i prisustvom matrice u istom materijalu. Iz tog razloga se tokom reciklaže kompozita ulaže velika količina energije, a dobija naspram toga mala količina i nizak kvalitet oporavljenih komponenti kompozita, to se naročito odnosi na ponovno dobijanje vlakana iz kompozita.

Od nedavno direktiva EU iz oblasti zaštite životne sredine propisuje reciklažu vozila, kao i reciklažu elektronskog otpada na kraju njihovog životnog veka, pa je zato u toku veliki broj istraživanja za pronalaženje najpogodnijih postupaka reciklaže kompozitnih materijala.

Postupci reciklaže kompozita se dele na mehaničke, termičke i hemijske. Mehanički postupci podrazumevaju korišćenje tehnika usitnjavanja i brušenja kompozitnih materijala i nakon toga razdvajanje na dve frakcije recyklata, jedne bogate vlaknima i druge bogate matricom. Obe frakcije recyklata se mogu ponovo koristiti u različite svrhe. Za izvođenje mehaničkih postupaka reciklaže kompozita je potrebna velika količina energije, dok je kvalitet dobijenih recyklata veoma loš. Reciklaža kompozita termičkim postupcima podrazumeva korišćenje visokih temperatura (300-1000 °C) na kojima se smola raspada i tako izdvajaju vlakna (ojačanja) iz kompozita. Primenom termičkog postupka reciklaže kompozitnih materijala, vlakna i neorganska ojačanja se regenerišu, a oslobađa se i određena količina toplotne energije tokom pirolize, gasifikacije ili sagorevanja. Ipak, usled delovanja toplote pri izvođenju termičke reciklaže dolazi do oštećenja vlakana. Hemijska reciklaža ima za cilj hemijsku depolimerizaciju ili uklanjanje matrice i oslobađanje vlakana iz kompozita pomoću organskih ili neorganskih rastvarača. Međutim, pri izvođenju hemijskog postupka reciklaže dolazi do nastajanja hemijskog otpada koji utiče na zagađenje životne sredine [3].

1. PREGLED RECIKLAŽNIH POSTUPAKA ZA RECIKLAŽU KOMPOZITNIH MATERIJALA

Zbog tehnoloških, ekonomskih i ekoloških ograničenja, postoji mali broj industrijalizovanih postupaka koje se koriste za reciklažu kompozitnih materijala. Usled povećane upotrebe kompozita i usled pooštrene ekološke EU regulative u poslednjih nekoliko decenija je povećan broj reciklažnih postupaka koji se primenjuju za reciklažu kompozita. Sveobuhvatni pregled o reciklažnim problemima i postupcima koji se odnose na kompozite dao je Henshaw sa saradnicima [4, 5]. Takođe, odličan pregled reciklažnih postupaka i tržišne perspektive koje se odnose na primenu kompozita sa recikliranim ugljeničnim vlaknima i polimernom matricom date su u radu Pimenta i saradnika [6]. Monografija koju je uredio Goodship [7] ažurira i sumira većinu aspekata u vezi sa reciklažom kompozitnih materijala. O reciklažnim problemima je već bilo reči u ASM priručniku o kompozitima [8]. Dobar pregled reciklažnih postupaka za kompozite sa termostabilnom polimernom matricom daju Pickering [9] i Job [10]. Razvoj postupaka reciklaže je uglavnom fokusiran na ovu vrstu kompozitnih materijala zbog njihove velike zastupljenosti na tržištu, kao i zbog tehničkih poteškoća odvajanja termostabilne polimerne matrice od ojačanja. Isto tako, razvijeni su reciklažni postupci i za druge vrste kompozita, kao što su kompoziti sa termoplastičnom polimernom matricom i kompoziti sa metalnom matricom [11].

2. OPERACIJE U SISTEMU RECIKLAŽE KOMPOZITNIH MATERIJALA

Sistem reciklaže čini niz operacija koje zavise jedna od druge. Neuspeh jedne od operacija ovog sistema podrazumeva da ceo sistem reciklaže ne može biti završen. Operacije koje su sastavni deo sistema reciklaže su sledeće [3]:

1) Dostupnost kompozitnog otpada. Otpad može nastati od proizvoda koji su na kraju svog životnog veka (stari otpad) ili može nastati od otpada koji nastaje tokom različitih proizvodnih procesa u industriji (novi otpad). U poređenju sa obimom proizvodnje metalnih materijala ili polimernih materijala nekompozitnog tipa, obim proizvodnje kompozitnih materijala je mnogo manji, pa je iz tog razloga ograničena dostupnost kompozitnog otpada koja je potrebna za ekonomski održivu reciklažu (npr. kompoziti u automobilske i avioindustriji se koriste 10-50 godina pre nego što dođe vreme za njihovu reciklažu).

2) Prikupljanje i transport kompozitnog otpada. Izuzetno je važan odgovarajući i efiksan sistem prikupljanja za kompozitnog otpada. Prikupljanje i transport potrošačkih proizvoda na kraju svog životnog veka su osnovni koraci u celom reciklažnom sistemu. Danas je sakupljanje auto-

mobila i aviona na kraju svog životnog veka veoma dobro organizovano. Transport proizvoda koji se mogu reciklirati se može razlikovati u zavisnosti od njihove veličine. Do reciklažnih postrojenja se mnogo lakše transportuje automobilski otpad zbog manjih dimenzija, gde se zatim demontira, a potom demontirani delovi usitnjavaju, u odnosu na avionski otpad koji se zbog ogromnih dimenzija mora najpre demontirati, pa tek onda transportovati do reciklažnih postrojenja.

3) Reciklaža. Reciklaža se vrši mehaničkim, termičkim ili hemijskim postupcima u zavisnosti od vrste kompozitnog materijala. Ova operacija predstavlja jezgro sistema reciklaže.

Postoje četiri tipa reciklaže koji se primenjuju pri reciklaži kompozitnog otpada [12]: a) primarna reciklaža – pretvaranje otpada u materijale koji imaju ista svojstva kao i originalni materijali; b) sekundarna reciklaža - pretvaranje otpada u materijale koji imaju lošija svojstva u odnosu na svojstva originalnih materijala; c) tercijalna reciklaža – pretvaranje otpada u hemikalije i gorivo; d) kvatenarna reciklaža – pretvaranje otpada u energiju.

4) Tržište recikliranih proizvoda – reciklata. Konkurentnost na tržištu proizvoda od recikliranih materijala se obezbeđuje dobrim kvalitetom i nižim cenama u odnosu na proizvode koji su izrađeni od nerecikliranih materijala. Ova operacija je ključni faktor koji diktira ceo sistem reciklaže kompozitnih materijala.

3. RECIKLAŽA KOMPOZITA SA TERMOPLASTIČNOM POLIMERNOM MATRICOM

Termoplastična polimerna matrica se, zbog svoje sposobnosti da se ponovo oblikuje pod uticajem toplote, može direktno reciklirati ponavljanjem postupaka topljenja i izlivanja pri čemu se dobija materijal dobrih svojstava [2]. Mehaničko usitnjavanje u vidu granula je najčešći postupak reciklaže vlakana u kompozitima sa termoplastičnom polimernom matricom. Neka istraživanja su pokazala da ponavljanje postupaka topljenja može izazvati degradaciju polimera u vidu skraćivanja polimernih lanaca i smanjenja raspodele molekulskih masa u polimeru, što utiče na viskozitet i mehaničke osobine polimera. Degradacija polimera može nastati i usled mehaničkog usitnjavanja, kao i zbog primene neodgovarajućih parametara prilikom postupka reciklaže (npr. visoka temperatura) što nanosi više štete nego ponavljanje postupaka topljenja u okviru propisanih parametara. Međutim, istraživanja pokazuju da je u većini slučajeva reciklažu moguće sprovesti bez značajnih gubitaka u svojstvima materijala [12].

Najveći nedostatak termoplastičnih matrica kompozita je njihova visoka viskoznost, pa se pri impregnaciji vlakana kod proizvodnje kompozita koriste visoki pritisci. Ovaj problem ima za posledicu

upotrebu skupih proizvodnih alata, kao i korišćenje velike količine energije u proizvodnim procesima. Međutim, razvojem nove generacije termoplastičnih matrica se došlo do toga da se koriste manji pritisci, jeftiniji proizvodni alati i manja količina energije prilikom proizvodnje kompozita sa ovim tipom matrica. Isto tako, one se i lakše recikliraju, na sličan način kao matrice malog viskoziteta (recikliranjem u vodi) [13, 14].

4. RECIKLAŽA KOMPOZITA SA TERMO-STABILNOM POLIMERNOM MATRICOM

Naveću primenu imaju kompozitni materijali sa termostabilnom polimernom matricom. Ova vrsta kompozita se ne može lako reciklirati jer je matrica čvrsto povezana sa vlaknima ili ojačanjem, tako da se ne može ponovo oblikovati kao što je to slučaj sa termoplastičnom polimernom matricom [2]. Reciklažni postupci (mehanički, termički i hemijski) koji se koriste za reciklažu kompozita sa termostabilnom polimernom matricom su dosta i izučavani i ispitivani, stoga je u nastavku dat njihov kratak pregled.

Mehanički postupci reciklaže

Mehanički postupak reciklaže počinje smanjenjem dimenzija kompozitnog otpada tako što se materijal seče ili drobi do veličine 50-100 mm malim brzinama sečenja. Nakon toga se dimenzija otpada dodatno smanjuje na red veličine od 10 mm do 50 μ m u mlinu čekićaru ili drugim vrstama mlinoва koji se koriste za fino mlevenje. Zatim se ovako dobijene fine čestice klasifikuju u ciklonima pomoću struje vazduha i prosejavanjem kroz sita, pri čemu na grubljim sitima zaostaje frakcija bogatija vlaknima, a na finijim sitima zaostaje frakcija bogatija matricom [2]. Palmer i saradnici [15, 16] su istraživali mogućnost korišćenja recikliranih vlakana kao ojačanja u proizvodnji novih kompozitnih materijala sa termostabilnom matricom. Rađeni su različiti testovi zatezanja i vršena su poređenja mehaničkih osobina recikliranih vlakana i kompozita u kojima su ona ugrađena u odnosu na kompozine materijale gde su korišćena nerekilirana vlakna. Ovi testovi pokazuju da su reciklirana vlakna nešto lošijih zateznih karakteristika i da imaju slabiji interfejs sa termostabilnom polimernom matricom u odnosu na nerekilirana vlakna. Ipak, može se konstatovati da nerekilirana staklena vlakna mogu uspešno biti zamenjena recikliranim u kompozitima sa termostabilnom polimernom matricom bez narušavanja standardne tehnike proizvodnje i uz minimalno smanjenje mehaničkih svojstava kompozita.

Termička reciklaža

Termička reciklaža kompozita podrazumeva postupke koji se vrše na visokim temperaturama. Postoje tri vrste termičkih postupaka reciklaže [3]:

1) Spaljivanje ili sagorevanje kompozita. Ovaj postupak se koristi samo za dobijanje energije.

2) Sagorevanje. Kod ovog postupka se dobijaju reciklirana vlakna ili ojačanja uz oslobađanje određene količine energije.

3) Piroliza. Pirolizom se dobijaju reciklirana vlakna i organske hemijske sirovine koje se dalje mogu koristiti kao gorivo u petrohemijskoj industriji.

Prvi proces koji se koristi isključivo za dobijanje energije nije svrstan u procese reciklaže, jer nema materijalnog opravka materijala iako se neorganski ostaci pri spaljivanju i sagorevanju mogu koristiti u cementnoj industriji.

Sagorevanje - postupak reciklaže u zagrejanju struji vazduha

Ovim termičkim postupkom se recikliraju staklena ili ugljenična vlakna kompozitnih materijala, a organske smole se koriste kao izvor energije. Veličina kompozitnog otpada se najpre redukuje na 25 mm, a zatim se reciklaža vrši u reaktoru u zagrejanju struji vazduha. Reaktor se podešava na 450 °C za kompozite sa poliestarskim smolama i do 550 °C sa epoksidnim smolama. Reciklirana (opravljena) vlakna su čista i imaju dužinu od 6 do 10 mm. Utvrđeno je da se staklena vlakna više oštećuju tokom termičkog tretmana u odnosu na ugljenična. Staklenim vlaknima se zatezna čvrstoća smanjuje za 50% pri termičkom tretmanu na 450 °C, dok ugljenična vlakna imaju manja oštećenja, svega 20% se smanjuje zatezna čvrstoća kod ugljeničnih vlakana pri termičkom tretmanu na temperaturi od 550 °C.

Piroliza

Piroliza je postupak razgradnje polimera ili depolimerizacija na visokim temperaturama od 300-800 °C u odsustvu kiseonika što omogućava reciklažu (oporavak) dugih vlakana. Može se primeniti i viša temperatura oko 1000 °C, ali u tom slučaju dolazi do velikog oštećenja vlakana. Postupak pirolize se može koristiti i za reciklažu polimera ili polimerne matrice kompozita. Kontrola temperature i vreme boravka kompozita u reaktoru je važno za kompletnu depolimerizaciju matrice i dobijanje čistih recikliranih vlakana [2,17]. U odnosu na proces sagorevanja pri čemu polimerne smole oksidišu do CO₂ i vodene pare uz oslobađanje energije, pirolitički proces će razbiti umrežene smole u organska jedinjenja nižih molekulskih masa koji mogu biti u vidu gasovitih, tečnih ili čvrstih ugljeničnih proizvoda. Ovako nastali proizvodi se mogu koristiti kao sirovine za dalju hemijsku preradu [2]. Na taj način piroliza ima prednost u odnosu na proces sagorevanja, a ovim postupkom se mogu reciklirati i staklena i ugljenična vlakna.

U praksi se postupak pirolize kombinuje sa postupkom sagorevanja u cilju dobijanja čistih vlakana.

To je u stvari neka vrsta kombinacije pirolize i gasifikacije. Međutim, visoka temperatura i oksidacija mogu izazvati veće oštećenje vlakana, pa o tome treba voditi računa.

Hemijska reciklaža

Hemijska reciklaža podrazumeva proces hemijske depolimerizacije ili uklanjanje matrice iz kompozita korišćenjem hemijskih reagenasa. Hemijskim postupkom reciklaže se mogu dobiti čista vlakna i ojačanja, kao i depolimerizovana matrica u obliku monomera i petrohemijskih sirovina. Proces rastvaranja matrice se često naziva solvoliza, a u zavisnosti od rastvarača može se dalje klasifikovati kao: hidroliza (sa vodom kao reagensom), glikoliza (sa glikolom kao reagensom) itd. Kako bi se ubrzalo rastvaranje i povećala efikasnost hemijskog procesa, često se koristi kombinacija alkohola i vode na visokim temperaturama i pritiscima koji su blizu kritičnih vrednosti [18]. Glikolizom se mogu razložiti epoksidne smole na svoje originalne monomere, koji se dalje mogu koristiti kao hemijske sirovine. Hemijski proces u kome se kao reagensi koriste voda i alkohol predstavlja ekološki proces, jer se na kraju postupka voda iz dobijenog rastvora izdvaja isparavanjem, dok se alkohol izdvaja destilacijom. Hemijska reciklaža se može koristiti za različite vrste kompozitnih materijala, kao i za reciklažu i staklenih i ugljeničnih vlakana. Reciklirana vlakna dobijena hemijskim postupkom zadržavaju većinu svojih mehaničkih osobina. Za postizanje veće efikasnosti i povećanje brzine hemijskog rastvaranja kao katalizatori se najčešće koriste alkalne baze kao što su NaOH i KOH.

ZAKLJUČAK

Sprovedena istraživanja o mogućnostima i različitim postupcima reciklaže kompozitnih materijala tek treba komercijalizovati. Nedostatak tržišta, visoki troškovi reciklaže i nizak kvalitet reciklata nasuprot novim materijalima su glavne prepreke komercijalizaciji i daljoj upotrebi recikliranih kompozita u različitim industrijskim granama. Donošenje adekvatnih zakona u oblasti zaštite životne sredine će pomoći promovisanju i unapređenju reciklažnih tehnologija. Međutim, potreban je dugoročan i detaljan plan za razvoj istih. Revolucionarne inovacije su neophodne u sledeće tri oblasti: a) razvoju novih i lako reciklabilnih kompozitnih materijala; b) efikasnije reciklaže materijala sa intenzivnim razdvajanjem i tehnologijom prečišćavanja; c) proizvodne tehnike koje bar delimično koriste reciklirana umesto samo novih vlakana.

Nadajmo se da će inovativna istraživanja dovesti do razvoja i prodora reciklažnih postupaka za recikliranje kompozitnih materijala koji će biti dostupniji i da će primena recikliranih kompozitnih materijala u industriji biti u stalnom porastu.

LITERATURA

- [1] Giulvezan G., Carberry B., Composite Recycling and Disposal An Environmental R&D Issue, Boeing Environmental Technotes, vol. 8, number 4, 2003 (Available online from: <http://www.boeing.com/companyoffices/doingbiz/environmental/TechNotes.html>)
- [2] Pickering S.J., Recycling technologies for thermoset composite materials-current status, Composites:part A 37 (2006) 1206-1215
- [3] Yang Y., Boom R., Irion B., Recycling of composite materials, Chemical engineering and processing 51 (2012) 53-6
- [4] Henshaw J.M., Han W., Owens A.D., An overview of recycling issues for composite materials, Journal of Thermoplastic Composite Materials 9 (1996) 4-20.
- [5] Henshaw J.M., Recycling and disposal of polymer-matrix composites, in: D.B. Miracle, S.L. Donaldson (Eds.), ASM Handbook, Vol. 21: Composites, ASM International®, 2001, pp.1006-1012.
- [6] Pimenta S., Pinho S.T., Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook, Waste Management 31 (2011) 378-392.
- [7] Goodship V. (Ed.), Management, Recycling and Reuse of Waste Composites, WP and CRC Press, Cambridge, UK, 2010.
- [8] Miracle D.B., Donaldson S.L. (Eds.), ASM Handbook - Volume 21: Composites, ASM Publication, 2001.
- [9] Pickering S.J., Recycling technologies for thermoset composite materials - current status, Composites: Part A (Applied Science and Manufacturing) 37 (2006) 1206-1215.
- [10] Job S., Composite recycling - summary of recent research and development, Materials KTN Report, September 2010. pp. 26.
- [11] Weiss D., Recycling and disposal of metal matrix composites, in: D.B. Miracle, S.L. Donaldson (Eds.), ASM Handbook, Volume 21: Composites, ASM International®, 2001, pp. 1013-1016.
- [12] Halliwell S., End of Life Options for Composite Waste, best practice guide (Available online from: <http://www.netcomposites.com>)
- [13] Thermoplastic composites explained (Available online from: <http://www.eirecomposites.com>)
- [14] Otheguy M.E., Gibson A.G., Robinson M., Recycling of end-of-life thermoplastic Composite boats, Plastics, Rubber and Composites 9/10 (38) (2009) 406-411
- [15] Palmer J., Mechanical recycling of automotive composites for use as reinforcement in thermoset composites. Ph.D. Thesis, University of Exeter, UK (2009)
- [16] Palmer J., Ghita O.R., Savage L., Evans K.E., Successful closed-loop recycling of Thermoset composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40 (4) (2009) 490-498.
- [17] Torres A., Marco I., Caballero B.M., Recycling by pyrolysis of thermoset composites: characteristics of the liquid and gaseous fuels obtained, Fuel 79 (2000) 897-902
- [18] Pinero-Hernanz R., Garsia-Serna J., Dodds C., Chemical recycling of carbon fibrecomposites using alcohols under subcritical and supercritical conditions, Journal of Supercritical Fluids 46 (2008) 83-92

IZVOD

MOGUĆNOSTI RECIKLAŽE KOMPOZITNIH MATERIJALA

Upotreba kompozitnih materijala je u stalnom porastu. Kompozitni materijali imaju široku primenu u različitim granama industrije, kao što su automobilska, avio industrija i druge. Međutim, oni se još uvek ne recikliraju adekvatno, najviše zbog njihove prirode, tj. heterogene strukture. Regulative koje se odnose na upravljanje otpadom i zaštitu životne sredine u Evropskoj Uniji propisuju da svi inženjerski materijali moraju biti reciklirani na kraju svog životnog veka, čime se postiže značajna ušteda energije. U ovom radu su prikazane različite mogućnosti reciklaže kompozitnih materijala. Postupci reciklaže mogu biti mehanički, toplotni i hemijski, u zavisnosti od primenjene operacije tokom procesa reciklaže. Mehanički postupci podrazumevaju korišćenje tehnika usitnjavanja kompozitnih materijala kako bi se dobili reciklati odgovarajućih dimenzija, nakon čega se isti mogu koristiti kao punioci ili kao ojačanja u novim kompozitnim materijalima. Termički postupci podrazumevaju korišćenje toplote tokom procesa reciklaže što rezultira oslobađanjem određene količine energije. U okviru hemijskih postupaka reciklaže primenjuje se proces depolimerizacije i uklanjanja matrice iz kompozita pomoću različitih reagenasa, čime se izdvajaju vlakna koja se mogu ponovo upotrebiti, a uklonjena matrica se određenim hemijskim postupcima može preraditi u koristan proizvod. Ipak, nedostatak adekvatnog tržišta, visoki troškovi reciklaže i neodgovarajući kvalitet recyklata su glavne prepreke komercijalizaciji reciklažnih postupaka kompozita.

Cljučne reči: reciklaža, mehanički, toplotni i hemijski postupci reciklaže, kompozitni materijali

SUMMARY

POSSIBILITIES OF COMPOSITE MATERIALS RECYCLING

The use of composite material increases. Composite materials are used in a wide range of applications such as automotive, aerospace and other industries. But they have not been properly recycled, due to their inherent nature of heterogeneity. The current and future waste management and environmental legislations in EU require all engineering materials to be properly recovered and recycled from end-of-life (EOL) products. Recycling will ultimately lead to resource and energy saving. This work presents different possibilities for recycling composite. Various technologies have been developed: mechanical recycling, thermal recycling, and chemical recycling, depending on the applied operations during the recycling process. Mechanical recycling techniques involve the use of grinding techniques to comminute the scrap material and produce recycled products in different size ranges suitable for reuse as fillers or partial reinforcement in new composite material. Thermal techniques involve the use of heat resulting in releasing certain amounts of energy. Chemical recycling involves the process for chemical depolymerisation or removal of the matrix by using chemical dissolution reagents for liberation of fibres which can be reused. The removed matrix can process a useful product using a specific chemical procedures. However a lack of adequate markets, high recycling cost, and lower quality of the recycles are the major commercialization barriers.

Key words: recycling, mechanical, thermal and chemical recycling, composite materials