

## MJERENJEM I MODELIRANJEM DO KVALITETA PROIZVODA OD KOMPOZITNIH MATERIJALA

MEASUREMENT AND MODELING TO THE QUALITY  
OF PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS

dr. sc. Fadil Islamović<sup>1</sup>, Beganović Mirzet dipl. ing. str.<sup>2</sup>, dr. sc. Dženana Gačo<sup>3</sup>  
mr. sc. Esad Bajramović<sup>4</sup>, dr. sc. Atif Hodžić<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup> Univerzitet u Bihaću – Tehnički fakultet Bihać, ul. dr. Irfana Ljubijankića bb  
77000 Bihać, Bosna i Hercegovina

<sup>2</sup> Regeneracija d.o.o Velika Kladuša, Seko bb  
77230 Velika Kladuša, Bosna i Hercegovina

UDK:

Izvorni znanstveni rad/*Original Scientific Paper*

Primljeno: 31. svibnja 2009./*Received: May 31, 2009*

Prihvaćeno: 03. srpnja 2009./*Accepted: July 03, 2009*

### SAŽETAK

*U radu će biti prikazana praksa, koja se u cilju dobijanja projektovanog kvaliteta proizvoda od kompozitnih materijala, u poduzeću „Regeneracija“ d.o.o Velika Kladuša - Bosna i Hercegovina vrše prethodna inženjerska eksperimentalna istraživanja i mjerenja, a na temelju istih i matematičko modeliranje posuda pod tlakom. Rad će potvrditi postavljenu hipotezu da je moguće dovesti u matematičku vezu i ovisnost kritični tlak posuda od kompozitnih materijala sa mehničkim karakteristikama materijala posude ( $\sigma_m$ ), prečnikom posude (D) i debljinom stijenke posude (s). Na taj način, variranjem spomenutih parametara, moguće je u proizvodnji posuda od kompozitnih materijala postići željeni kvalitet proizvoda postizanjem projektovanog kritičnog, a samim time i radnog tlaka.*

**Ključne riječi:** kvalitet proizvoda, eksperimentalno mjerenje, matematičko modeliranje, kompozitni materijal, posude pod tlakom, kritični tlak, radni tlak.

### 1. UVOD

Savremene konstrukcije zahtijevaju nove materijale specijalnih osobina i oblika koji mogu da odgovore specifičnim uslovima eksploatacije: povišenoj čvrstoći, otpornosti na tlak, temperaturi, brzini, udaru, vibracijama, i dr. Svrha usvajanja novih konstrukcijskih materijala je odgovor na sve složenije zahtjeve u pogledu izdržljivosti i performansi savremenih konstrukcija, kao i na sve veća ograničenja u pogledu težine. Da bi se postavljene zahtjevi ispunili neizbježan je kompromis u postizanju lake konstrukcije i visokih mehničkih svojstava materijala. Primjena kompozitnih materijala omogućava ispunjenje ovako postavljenih zahtjeva [1].

Jedan od važnih parametara za projektante posuda pod tlakom od kompozitnih materijala je da se zna pri kojem tlaku će doći do otkaza odnosno pucanja posuda u odnosu na odabrane

kombinacije materijala. Vrijednosti tog kritičnog tlaka zavise i od orijentacije ojačanja u kompozitu. Kako znamo da se kompozitni materijal sastoji od matrice (u našem slučaju poliesterska smola) i ojačanja (imat ćemo dvije vrste ojačanja mata i mata-rowing), teško je definisti karakteristike materijala bez eksperimentalnih metoda. Projektanti se susreću sa velikim problemima kod projektovanja posuda od kompozitnih materijala, pošto na tržištu postoji puno proizvođača smole kao i staklenih ojačanja tako da različite kombinacije daju različite karakteristike materijala. Posude pod tlakom od kompozitnih materijala se uglavnom koriste za tretman vode kao što su pješčani filteri, omekšivači vode, filteri sa aktivnim ugljem, reverzna osmoza i dr., kao i posude pod tlakom u postrojenjima za prečišćavanje vazduha, a izrađuju se u horizontalnoj i vertikalnoj izvedbi prečnika od 500 [mm] do 2.400 [mm], u klasama 2, 4, 5, 6 i 10 [bara].

U svrhu dobijanja rezultata izvedena su dva eksperimenta. Prvi dio eksperimenta se odnosi na definisanje mehaničkih karakteristika epruveta napravljenih od kompozitnih materijala, dok se drugi dio eksperimenta odnosi na definisanje kritičnog tlaka pri kojem će doći do popuštanja posuda. Nakon dobijanja eksperimentalnih rezultata izvršeno je matematičko modeliranje kritičnog tlaka na osnovu ulazno-izlaznih parametara procesa, odnosno matematičko modeliranje kritičnog tlaka. Dakle, eksperimentalnim mjerenjima, te matematičkim modeliranjem biće dokazano da je kritični tlak posuda od kompozitnih materijala moguće dovesti u vezu sa mehaničkim karakteristikama materijala ( $\sigma_M$ ), prečnikom (D) i debljinom stijenke posude (s), tj. da je  $p_{kr} = f(s, D, \sigma_M, \dots)$ , te da je na taj način, variranjem spomenutih parametara, moguće u proizvodnji posuda od kompozitnih materijala postići željeni kvalitet proizvoda postizanjem projektovanog kritičnog, a samim time i radnog tlaka.

## 2. EKSPERIMENTALNA MJERENJA

Kako smo već naveli na tržištu se nude mnogi materijali za izradu kompozita, tako da pri izboru različitih materijala dobijemo različite mehaničke karakteristike konačnog kompozita. Iz navedenih razloga smo se odlučili da se prije izrade posuda za testiranje kritičnog tlaka prvo naprave kompozitne epruvete i ispituju njihove mehaničke karakteristike. Kako smo već naveli u našem radu će biti prikazana dva eksperimenta. Prvi dio eksperimenta se odnosi na određivanje mehaničkih karakteristika kompozita, dok se drugi dio eksperimenta odnosi na određivanje kritičnog tlaka posuda izrađenih od kompozitnih materijala.

### 2.1. Prvi dio eksperimenta-određivanje mehaničkih karakteristika kompozita

Za izradu epruveta i izvođenje eksperimenta su korišteni slijedeći standardi: ISO 527-1, ISO 527-2, i ISO 527-4. Tablica 1. daje prikaz epruveta tipa A i B.

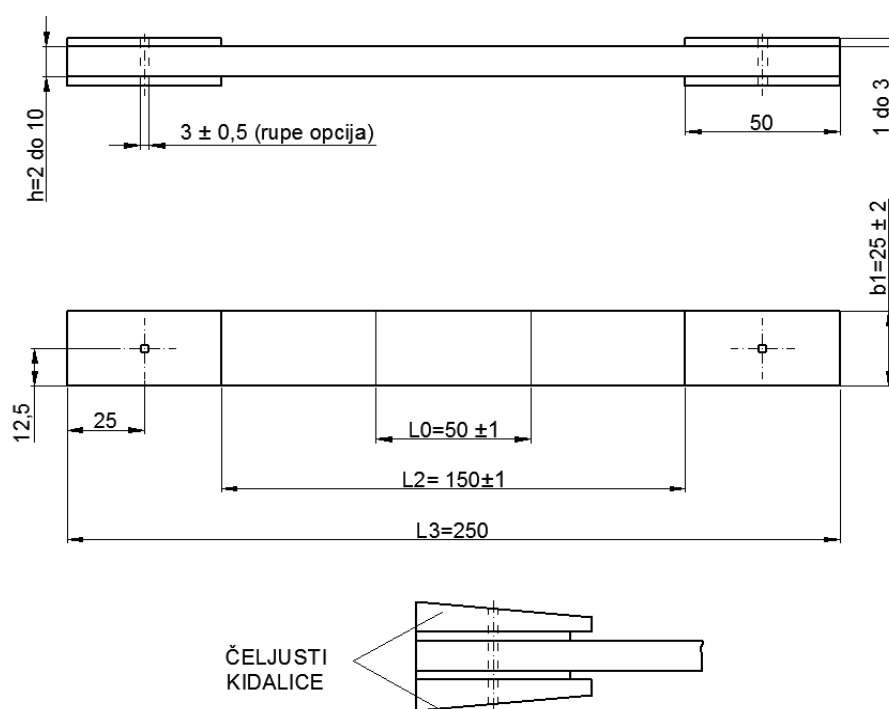
Tablica 1. Epruvete za testiranje mehaničkih karakteristika

| Tip epruveta | Laminat plan   |
|--------------|--|
| Tip A        | 4xmat 450 g/m <sup>2</sup>   |
| Tip B        | 2xmat 450 g/m <sup>2</sup> + 1xrowing 500 g/m <sup>2</sup> + 2matx450 g/m <sup>2</sup> |

Prvi dio eksperimenta se odnosio na testiranje mehaničkih karakteristika kao što su zatezna čvrstoća i modul elastičnosti opterećenjem na zatezanje. Ispitivanja su rađena u laboratorijama na VTI-Vojnotehničkom institutu u Beogradu kao i na Tehničkom Fakultetu Univerziteta u Bihaću na kidalici 50 KN (slika 2.).

Na slici 1. dat je prikaz dimenzija epruveta za testiranje kompozitnih materijala.

Slika 1. Dimenzije epruvete prema ISO 527-4



Slika 2. Ispitivanje epruveta na VTI u Beogradu i Tehničkom fakultetu Univerziteta u Bihaću



U narednim tablicama su prikazani rezultati dobiveni ispitivanjem epruveta tipa A i B.

Tablica 2. Rezultati testiranja epruveta tipa A [2]

| Oznaka epruvete    | Sila kod kidanja<br>$F_m$ [KN] | Zatezna čvrstoća<br>$\sigma_m$ [MPa] | Modul elastičnosti<br>$E$ [MPa] | Konačno izduženje<br>$\epsilon$ [%] |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| A1                 | 9,53                           | 112,12                               | 6481,78                         | 2,1                                 |
| A2                 | 9,09                           | 110,99                               | 6659,95                         | 2,6                                 |
| A3                 | 9,63                           | 113,23                               | 7137,16                         | 3,0                                 |
| A4                 | 10,48                          | 125,81                               | 6280,61                         | 3,1                                 |
| A5                 | 9,95                           | 128,30                               | 6399,80                         | 2,7                                 |
| Srednje vrijednost | 9,74                           | 118,09                               | 6591,86                         | 2,70                                |

Tablica 3. Rezultati testiranja epruveta tipa B [2]

| Oznaka epruvete | Sila kod kidanja<br>F <sub>m</sub> [KN] | Zatezna čvrstoća<br>σ <sub>m</sub> [MPa] | Modul elastičnosti<br>E [MPa] | Konačno izduženje<br>ε [%] |
|-----------------|---|--|-------------------------------|----------------------------|
| B1              | 13,60                                   | 172,44                                   | 8158,47                       | 2,0                        |
| B2              | 14,71                                   | 175,37                                   | 8485,56                       | 3,6                        |
| B3              | 12,31                                   | 145,51                                   | 8165,65                       | 2,5                        |
| B4              | 14,01                                   | 168,47                                   | 8122,72                       | 2,2                        |
| B5              | 13,39                                   | 144,26                                   | 7953,04                       | 2,5                        |
| Sr. vrijednosti | 13,60                                   | 161,21                                   | 8177,09                       | 2,56                       |

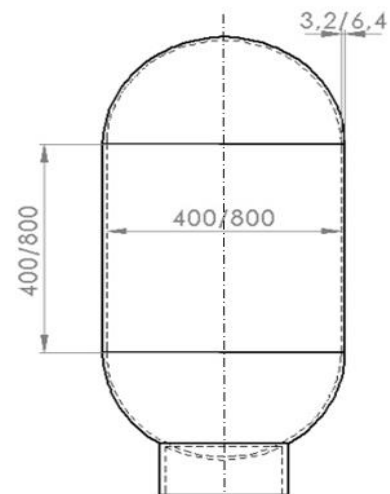
## 2.2. Drugi dio eksperimenta-mjerenje kritičnog tlaka posuda od kompozitnih materijala

Za drugi dio eksperimenta izrađeno je osam posuda sa dva različita prečnika, dvije različite debljine i dvije vrste kompozitnih ojačanja. Postupak izrade i testiranja navedenih posuda izveden je prema standardu BAS EN 13923, u poduzeću „Regeneracija“ d.o.o. V. Kladuša. U tablici 4. je prikazan plan izrade posuda gdje se vidi struktura kompozitnog materijala za različite posude, a na slici 4.9. geometrija posude za testiranje sa variranim dimenzijama (prečnik, dužina, debljina).

Tablica 4. Laminat plan za izradu posuda

| R/b | Prečnik D [mm] | Laminat plan       |
|-----|----------------|--------------------|
| 1   | 400            | 4 mate             |
| 2   | 800            | 4 mate             |
| 3   | 400            | 8 mata             |
| 4   | 800            | 8 mata             |
| 5   | 400            | 3 mate + rowing    |
| 6   | 800            | 3 mate + rowing    |
| 7   | 400            | 6 mata + 2 rowinga |
| 8   | 800            | 6 mata + 2 rowinga |

Slika 3. Dimenzije posuda za testiranje



Na slici 4. prikazane su svih osam izrađenih posuda od kompozitnih materijala prije testiranja.

Slika 4. Posude od kompozitnih materijala prije testiranja



Za drugi dio eksperimenta je korištena pumpa REMS E - Plush sa mogućnošću postizanja tlaka do 60 bara sa skalom 2 bara, a eksperiment je izveden u krugu poduzeća Regeneracija d.o.o. Velika Kladuša. Tablica 5. prikazuje dobijene rezultate za svih osam testiranih posuda u ovisnosti od prečnika, debljine stijenke i karakteristike materijala.

Tablica 5. Rezultati izmjerenog kritičnog tlaka [2]

| R/b | D [mm] | s [mm] | $\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Eksperimentalni rezultati [bar] |
|-----|--------|--------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1   | 400    | 3,2    | 118                             | 22,0                            |
| 2   | 800    | 3,2    | 118                             | 9,0                             |
| 3   | 400    | 6,4    | 118                             | 30,0                            |
| 4   | 800    | 6,4    | 118                             | 17,0                            |
| 5   | 400    | 3,2    | 169                             | 26,5                            |
| 6   | 800    | 3,2    | 169                             | 12,5                            |
| 7   | 400    | 6,4    | 169                             | 35,0                            |
| 8   | 800    | 6,4    | 169                             | 20,5                            |

### 2.3. Analiza rezultata eksperimenta

U prvom dijelu eksperimenta smo dobili zateznu čvrstoću, modul elastičnosti i konačno izduženje za dvije vrste epruveta kako smo prethodno pokazali. Naredna tablica 6. prikazuje srednje vrijednosti dobijenih rezultata, tako da se vidi povećanje mehaničkih karakteristika kod primjene ojačanja u obliku rowing-a.

Tablica 6. Srednje vrijednosti dobijenih rezultata

| Oznaka epruvete | Sila kod kidanja $F_m$ [KN] | Zatezna čvrstoća $\sigma_m$ [MPa] | Modul elastičnosti $E$ [MPa] | Konačno izduženje $\varepsilon$ [%] |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| A               | 9,74                        | 118,09                            | 6591,86                      | 2,70                                |
| B               | 13,60                       | 161,21                            | 8177,09                      | 2,56                                |

Drugi dio eksperimenta se odnosio na određivanje kritičnog tlaka u odnosu na postavljene parametre, tako da se u tablici 5. vide dobijeni rezultati kritičnog tlaka za osam testiranih posuda koji predstavljaju osnovnu podlogu za matematičko modeliranje kritičnog tlaka. Potrebno je naglasiti da je kod prve četiri posude koje su bile izrađene sa ojačanjima u obliku mate prilikom pucanja došlo do totalnog oštećenja kako je prikazano na slici 5. a), odnosno usljed djelovanja cirkularnog napona doslo je do popuštanja cilindričnog dijela posude koje je prouzrokovalo pukotinu uzduž cijele posude, odnosno uzduž cilindričnog dijela posude [2].

Slika 5. a) Izgled popuštanja posuda izrađenih od ojačanja u obliku mate (lijevo)

b) Izgled popuštanja posuda izrađenih od ojačanja u obliku mate i rowinga (desno)



Ostale četiri posude koje u svojoj strukturi imaju neprekidna vlakna (rowing), u momentu kritičnog tlaka, popustile su samo na jednom mjestu kako je prikazano na slici 5. b). Neprekidna vlakna uslijed popuštanja posude pod određenim tlakom nisu dozvolila da se pukotina prenese na ostatak posude nego su izvršila lokalizaciju pukotine, što posudama koje u svojoj strukturi imaju rowing, iz sigurnosnih razloga, daje ogromnu prednost [2].

### 3. MATEMATIČKO MODELIRANJE KRITIČNOG TLAKA

Eksperimentalna istraživanja služe za provjeru, korekciju i verifikaciju numeričkih rezultata, te za matematičko modeliranje koje najrealnije opisuje obradne procese i sisteme. Tehnološko oblikovanje i projektiranje modernih procesa obrade zahtjeva analizu svih tehničko-tehnoloških parametara procesa i primjene znanstvenih metoda u cilju modeliranja i definiranja optimalnih uvjeta obradnih procesa i sistema [3].

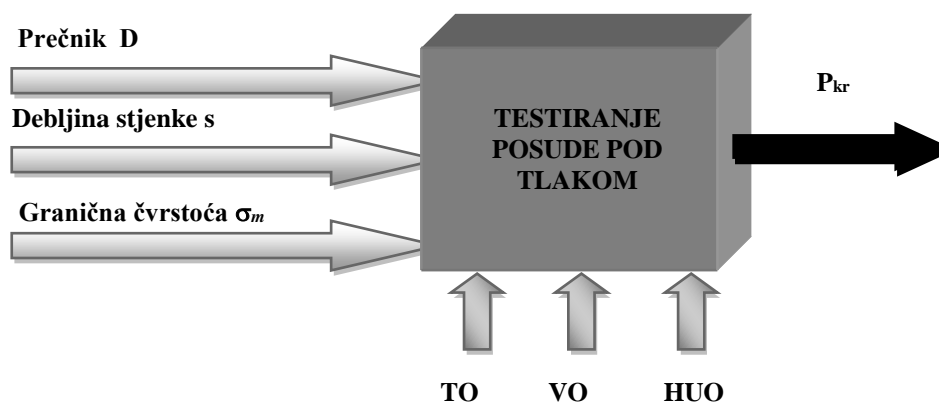
U našem slučaju na osnovu ulaznih parametara i eksperimentalnih rezultata je potrebno doći do matematičkog modela za kritični tlak, tj. da mjenajuću ulazne parametre znamo do kojeg konačnog tlaka posuda može podnijeti opterećenje, odnosno tlak.

Tablica 7. Varijable i rezultati eksperimenta

| N | Fizikalne varijable |                 |  | Eksperimentalni rezultati |
|---|---------------------|-----------------|--|---------------------------|
|   | $X_1$<br>D [mm]     | $X_2$<br>s [mm] | $X_3$<br>$\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $P_{kr}$ [bar]            |
| 1 | 400                 | 3,2             | 118                                      | 22,0                      |
| 2 | 800                 | 3,2             | 118                                      | 9,0                       |
| 3 | 400                 | 6,4             | 118                                      | 30,0                      |
| 4 | 800                 | 6,4             | 118                                      | 17,0                      |
| 5 | 400                 | 3,2             | 169                                      | 26,5                      |
| 6 | 800                 | 3,2             | 169                                      | 12,5                      |
| 7 | 400                 | 6,4             | 169                                      | 35,0                      |
| 8 | 800                 | 6,4             | 169                                      | 20,5                      |

Da bi se mogao izvesti eksperiment potrebno je prije toga ograničiti eksperiment tj. treba izdvojiti nekoliko uticajnih faktora iz velikog broja istih, kao i izlaznu veličinu koju želimo mjeriti. Pošto je u ovom radu zadatak dobiti matematički model za kritični tlak, na slici 6. možemo vidjeti parametre koje smo izabrali da će utjecati na ovaj proces.

Slika 6. Šema ulazno - izlaznih parametara [2]



Za izbor tipa matematičkog modela ne postoji opće važeće pravilo, a to znači da za svaki istraživani proces ili sistem treba izabrati model i izvršiti provjeru njegove tačnosti i adekvatnosti u odnosu na realni proces. U ovom eksperimentu postoje tri nezavisno promjenjive veličine, te postoje tri varijabilna faktora tj.  $k=3$ , a varijacija faktora je na dva nivoa  $r = 2$  (min i max) što znači da ima karakter trofaktornog plana eksperimenta gdje je potreban broj mjerenja:

$$N = r^k = 2^3 = 8 \quad (1)$$

$r$  - broj nivoa osnovnih faktora ( $r = 2$ , min i max)

$k$  - broj variranih osnovnih faktora ( $k = 3$ )

$N = r^k$  – broj ponavljanja eksperimenta sa variranjem faktora ( $N=8$ )

Početni matematički model je trofaktorni polinom prvog reda:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (2)$$

Uvrštavanjem dekodiranih vrijednosti dolazimo do konačnog matematičkog oblika:

$$P_{kr} = 18,06 - 0,034D + 2,54s + 0,081\sigma_m \quad (3)$$

U tablici 8. su prikazani uporedni rezultati dobijeni prema matematičkom modeliranju i prema eksperimentalom mjerenju.

Tablica 8. Rezultati kritičnog tlaka eksperimenta i matematičkog modela [2]

| N | Fizikalne varijable |                 |  | Eksperimentalni rezultati | Rezultati matematičkog modela |
|---|---------------------|-----------------|--|---------------------------|-------------------------------|
|   | $X_1$<br>D [mm]     | $X_2$<br>s [mm] | $X_3$<br>$\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $P_{kr_{exp}}$ [bar]      | $P_{kr_{mat}}$ [bar]          |
| 1 | 400                 | 3,2             | 118                                      | 22,0                      | 22,1                          |
| 2 | 800                 | 3,2             | 118                                      | 9,0                       | 8,5                           |
| 3 | 400                 | 6,4             | 118                                      | 30,0                      | 30,3                          |
| 4 | 800                 | 6,4             | 118                                      | 17,0                      | 16,7                          |
| 5 | 400                 | 3,2             | 169                                      | 26,5                      | 26,3                          |
| 6 | 800                 | 3,2             | 169                                      | 12,5                      | 12,7                          |
| 7 | 400                 | 6,4             | 169                                      | 35,0                      | 34,4                          |
| 8 | 800                 | 6,4             | 169                                      | 20,5                      | 20,8                          |

Dobiveni matematički model kritičnog tlaka (3) je dobar pokazatelj projektantima da znaju do kojeg kritičnog tlaka može izdržati navedena posuda, te na osnovu toga napraviti blic kontrolu radnog, odnosno projektovanog tlaka. Prikazani matematički model za testirane posude pod tlakom daje rezultate sa odstupanjem  $\pm 0,5$  bara u odnosu na rezultate eksperimenta, tako da se sa vrlo dobrom tačnošću može reći na kojem tlaku će doći do totalnog oštećenja posude, tj. do otkaza ili pucanja posude pod tlakom.

#### 4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je pokazao da je eksperimentalnim istraživanjima i mjerenjima moguće doći do veoma korisnih rezultata koji mogu poslužiti kao ulazni podaci za izradu matematičko-stohastičkog modela posuda pod tlakom od kompozitnih materijala.

Izradom matematičkog modela potvrđena je postavljena hipoteza rada da je moguće dovesti u matematičku vezu i ovisnost kritični tlak posuda od kompozitnih materijala sa mahaničkim

karakteristikama kompozitnog materijala posude ( $\sigma_m$ ), prečnikom posude (D) i debljinom stijenke posude (s).

Ovako dobijen matematički model kritičnog tlaka je dobar pokazatelj projektantima da znaju do kojeg kritičnog tlaka može izdržati navedena posuda, te na osnovu toga napraviti blic kontrolu radnog, odnosno projektovanog tlaka.

Prikazani matematički model za testirane posude pod tlakom daje rezultate sa odstupanjem  $\pm 0,5$  bara u odnosu na rezultate eksperimenta, tako da se sa vrlo dobrom tačnošću može reći na kojem tlaku će doći do otkaza ili pucanja posude pod tlakom.

Na ovaj način, variranjem spomenutih parametara, moguće je u proizvodnji posuda od kompozitnih materijala postići željeni kvalitet proizvoda postizanjem projektovanog kritičnog, a samim time i radnog tlaka.

## 5. PRIJEVOD SAŽETKA

Abstract:

### MEASUREMENT AND MODELING TO THE QUALITY OF PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS

*The paper will present the practice, which is designed in order to obtain quality products from composite materials in the company "Regeneracija", Ltd. Velika Kladuša - Bosnia and Herzegovina, and previous engineering experimental research and measurements, and based on them mathematical modeling of pressure vessels. The paper will confirm the hypothesis that it is possible to bring in mathematical relationship and dependence the critical pressure of composite materials vessels with mechanical properties of the vessel material ( $\sigma_m$ ), vessel diameter (D) and the thickness of the vessel wall (s). Thereby, by varying the above mentioned parameters, it is possible to achieve the desired product quality in the manufacturing of the vessels of composite materials, by achieving designed critical, and thus the operating pressure.*

**Key words:** product quality, experimental measurement, mathematical modeling, composite material, pressure vessels, critical pressure, operating pressure.

## 6. LITERATURA

- [1] S. Kadić, *Prilog analizi mehaničkih i eksploatacijskih svojstava kompozitnih materijala*, Magistarski rad, Univerzitet u Bihaću - Tehnički fakultet Bihać, Bihać, 2006.
- [2] M. Beganović, *Teorijsko-eksperimentalna analiza i matematičko modeliranje kritičnog tlaka posude od kompozitnih materijala*, Magistarski rad, Univerzitet u Bihaću - Tehnički fakultet Bihać, Bihać, 2012.
- [3] M. Jurković, "Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema", Univerzitet u Bihaću - Mašinski fakultet Bihać, Bihać, 1999.