

OPTIMIZACIJA ENERGETSKIH UŠTEDA U PROCESU PROIZVODNJE POTPLATA ZA CIPELE

Ivana Špelić¹, Alka Mihelić-Bogdanić¹, Rajka Budin²

¹Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Prilaz baruna Filipovića 28 a, 10 000 Zagreb, Hrvatska

E-mail: ispelic@ttf.hr; amihelic@ttf.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Marulićev trg 19, 10 000 Zagreb, Hrvatska

E-mail: rbudin@fkit.hr

Izvorni znanstveni rad
UDK: 66.011/.012:685.34.024.5

Sažetak

Od 1970-ih godina najpopularniji potplati cipela jesu EVA potplati, napravljeni od etilen vinil acetata, kopolimera koji se sastoji od etilena i vinil acetata. Duromeri i elastomeri (gume), među koje ubrajamo i EVA polimere, čine oko 30 % ukupne proizvodnje u tonama svih proizvedenih sintetskih polimera, pri čemu gume sintetskog podrijetla premašuju količinom proizvodnju guma prirodnog podrijetla. Imajući tu činjenicu na umu, energetske uštede u tvornicama proizvodnje gume iznimno su važne, a ovaj rad analizira potencijale energetske uštede u proizvodnji potplata za cipele napravljenih od etilen vinil acetata (EVA). EVA potplati za cipele jesu lagani, jednostavni za modeliranje, vodootporni i vlagootporni, jako elastični, amortiziraju udarce, dobri su toplinski izolatori, iznimno su otporni itd.

Energetske uštede povratom topline procesnoga kondenzata prezentirane su u procesu proizvodnje potplata za cipele. Povrat topline kondenzata rezultira smanjenom potrošnjom pojne vode, znatnim uštedama goriva potrebnog za proizvodnju pare i rezultiraju smanjenom potrošnjom kemikalija potrebnih u proizvodnom procesu. Povrat vreloga procesnoga kondenzata u kotao rezultira smanjenjem potrošnje nafte 14,9 %. Također se smanjuje toplinsko zagađenje 95,3 %, dok se volumen ispušnih plinova smanjuje od 17,11 m³_{FG}/kg_{NEC} do 14,57 m³_{FG}/kg_{NEC} ili 14,8 %. Ovakav sustav omogućuje istodobnu uštedu nafte i smanjenje toplinskog zagađenja. Usporedbom procesa s povratom topline dimnih plinova u odnosu prema procesu bez povratka topline dimnih plinova, pokazuje uštede od 18,76 %, uz smanjenje temperature dimnih plinova sa 221° C na 137,39° C, pri čemu se volumen dimnih plinova smanjuje na 13,90 m³_{FG}/kg_P.

Ključne riječi

energetske uštede; povrat topline kondenzata; proizvodnja potplata za cipele, etilen vinil acetat (EVA), smanjenje toplinskog zagađenja

1. UVOD

Prošlo stoljeće obilježeno je pojavom novih plastičnih pjena, a na svjetskom su tržištu, između ostaloga, predstavljene i nove duromerne termoreaktivne pjene. Duromerne termoreaktivne pjene, u koje spadaju i prirodne i sintetske gume, nemaju termoplastična svojstva i proizvode se istodobnim stvaranjem polimera uz generaciju plina. Općenito, bilo koja reakcija formiranja polimera može se upotrebljavati za pripremu pjena. Prva proizvodnja gume počela je u Prvom svjetskom ratu kad su uvedeni gumeni proizvodi od prirodne i sirove gume (Landrock, 1995.). Proizvodni materijali klasificiraju se kao metali, keramika, polimeri i kompoziti. Polimeri se nadalje klasificiraju kao termoplasti, termostati i elastomeri. Termoplastični polimeri mogu se podvrgnuti višestrukim ciklusima zagrijavanja i hlađenja bez bitnog mijenjanja molekularne strukture polimera. Uobičajeni termoplasti uključuju polietilen, polistiren, polivinilklorid i najlon (Groover, 2010.).

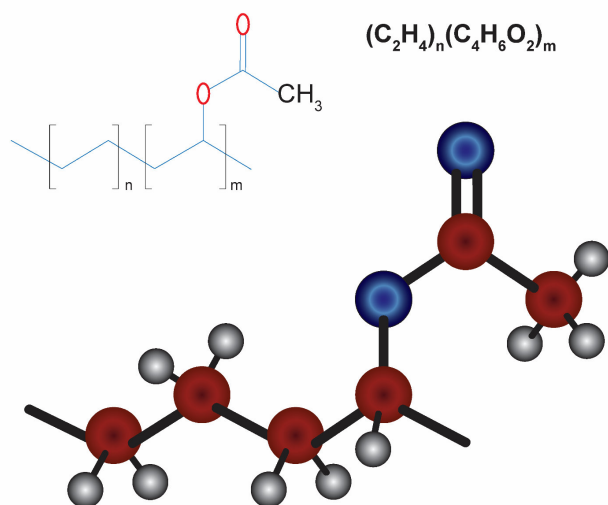
U proizvodnji i preradi gume sudjeluje nekoliko industrija, ali danas većina proizvedene gume na tržištu dolazi u obliku sintetskih guma, koje proizvodi petrokemijska industrija u tvornicama za preradu. Mnogi pjenasti gumeni dijelovi, kao što su potplati cipela, proizvode se modeliranjem u kalupima. Proizvodi sastavljeni od termoplastičnih polimera, koji uključuju etilen vinil acetat, polietilen, stiren blok kopolimer, butil gumu, poliamid, poliuretan i poliester, mogu se pripremiti kao vruća talina. Jednokomponentni termoplastični materijal stvrdnjava se iz taline nakon hlađenja na povišenim temperaturama (Groover, 2010.).

Potplati cipela donji su dio cipela u izravnom dodiru s podom. Danas se obično izrađuju od sintetičkih polimera kao što su poliizopren (IR), termoplastični poliuretan (TPU), poliuretanske pjene, etilen vinil acetat (EVA) ili polivinilklorid (PVC). Sintetski polimeri izrađeni su od raznih monomera na bazi nafte, a polimeri su

postali glavni specijalizirani materijali za industriju obuće (Karkalića i sur., 2017.).

Od nastanka 1970-ih, najpopularniji potplati jesu potplati etilen vinil acetata (EVA) (Wang et al., 2012.; Fuss i sur., 2014.). Za industriju obuće proizvodi se mnogo artikala koji se koriste EVA smjesom (Lopes et al., 2015.). Etilen vinil acetat je kopolimer na bazi polimera koji se sastoji od etilena i vinil acetata (Shi et al., 2008.; Brito e Dias et al., 2018.), također nazvan ekspanzirana guma ili pjenasta guma (sl. 1.). To je poliolefin s težinom etilena čiji postotak varira od 60 do 90 % (Mike Chung, 2002.), dok postotak težine vinil acetata obično varira od 10 do 40 % (Nautiyal, 2012.).

Etilen vinil acetat (EVA)



Slika 1. Strukturna formula etilen vinil acetata (EVA)

Etilen vinil acetat može se oblikovati ubrizgavanjem u kalupe kao i drugi poliolefinski elastomeri (nova klasa polimera, uglavnom kopolimeri etilen-butena ili etilen-oktena, proizvedeni s pomoću metalokenskoga katalizatora) (Mike Chung, 2002.). EVA materijal ima dobru jasnoću, otpornost pri niskim temperaturama, otpornost na pukotine, vodootpornost, koja se postiže primjenom vrućih rastaljenih ljepila, otpornost na UV zračenje, sličnu mekoću, ekstremnu elastičnost i fleksibilnost kao i elastomerni materijali, ali se može obrađivati kao i drugi termoplastični materijali (Mike Chung, 2002.; Wang i sur., 2012.; Nautiyal, 2012.). Glavno obilježje EVA materijala jest znatna elastičnost koju karakterizira Youngov modul elastičnosti u rasponu od 15 do 80 MPa (Brito e Dias et al., 2018.).

EVA je također poznata pod nazivima ekspanzirana guma ili pjenasta guma. Materijal je poznat kao lagan i lak za oblikovanje, a popularan je jer je jeftiniji u usporedbi s prirodnom gumom. Ostala popularna svojstva uključuju dobru otpornost na vodu i vlagu, visoku elastičnost, veliku mogućnost apsorpcije udara, dobra toplinska izolacijska svojstva, izdržljivost, otpornost na niske temperature, otpornost na pucanje, otpornost na vruće ljepilo i otpornost na UV zračenje (Jeng et al., 2012.). Potplati od etilen vinil acetata (EVA)

poznati su po svojoj mekoći i fleksibilnosti (sl. 2.). Obrađuju se kao i drugi termoplastični materijali. EVA ima malo ili nimalo mirisa i konkurentna je gumenim i vinilnim proizvodima u mnogim električnim primjenama (Nautiyal, 2012.).



Slika 2. EVA potplati za tenisice

1.1. PROCES OBLIKOVANJA POTPLATA CIPELA UBRIZGAVANJEM

Glavni postupci oblikovanja gume jesu (Groover, 2010.):

1. oblikovanje prešanjem
2. transferno oblikovanje prešanjem
3. oblikovanje ubrizgavanjem (injekcijsko prešanje).

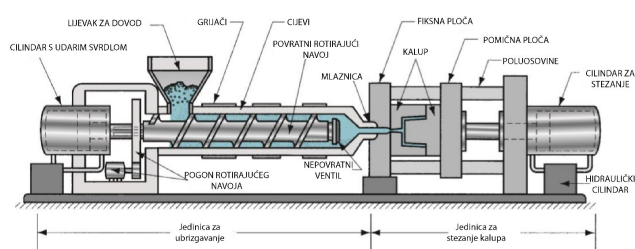
Postoje dva osnovna načina oblikovanja EVA potplata za cipele. Prvi način oblikovanja EVA potplata prešanjem (CMEVA) dobiva se punjenjem kalupa s kuglicama EVA polimera, kako bi se postigao željeni oblik ili utiskivanjem bloka EVA pjene u metalni kalup. Toplina i tlak djeluju na kalup, prouzrokujući rastapanje kuglica ili prouzrokuju širenje EVA pjene, koja ispunjava šupljinu kalupa. Drugi je postupak oblikovanje ubrizgavanjem (injekcijsko prešanje). Izravno je ubrizgavanje proces ubrizgavanja grijanog termoplastičnog polimera u visoko plastičnom stanju pod visokim tlakom u šupljinu kalupa, kako bi se postigao željeni oblik. Procesom se proizvode zasebne komponente u oblik koji gotovo savršeno odgovara obliku kalupa. Uobičajeno vrijeme proizvodnog ciklusa u rasponu je od 10 do 30 sekundi (Groover, 2010.). Kad se materijal stvrdne u kalupu, on poprima željeni oblik i uklanja se iz kalupa. Injekcijsko prešanje vrlo je popularno zbog izostanka sirovinskih gubitaka jer je iskorištenje potpuno. Kalupi s jednom šupljinom ili višestrukim šupljinama obično su izrađeni od čelika, aluminija ili nehrđajućeg čelika (López, 2014.). Injekcijsko prešanje ekonomski je isplativo samo u slučaju velikih proizvodnih količina. Kod injekcijskog

prešanja gume postoji rizik prijevremenog stvrdnjavanja. Prednosti injekcijskog prešanja uključuju bolju dimenzijsku kontrolu, manje otpadaka i kraće vrijeme ciklusa. Zbog visokih troškova kalupa potrebne su velike proizvodne količine, kako bi se opravdalo injekcijsko prešanje (Groover, 2010.).

Stroj za injekcijsko prešanje sastoji se od (sl. 3.):

1. jedinica za ubrizgavanje plastike (slično ekstruderu)
2. jedinica za stezanje kalupa (preša).

Jedinica za brizganje plastike sastoji se od cijevi, koja se napaja lijevkom za dovod plastičnih kuglica. Unutar cijevi je povratna rotirajuća jedinica koja okreće i zagrijava polimer, a također ubrizgava rastaljenu plastiku u kalup. Jedinica za stezanje kalupa sadržava dvije ploče, fiksnu i pomičnu ploču, međusobno smještene u pravilnom odnosu, i drži kalup zatvoren tijekom ubrizgavanja primjenom sile stezanja, koja je dovoljna da se odupre sili ubrizgavanja i otvori i zatvori kalup (Groover, 2010.).



Slika 3. Stroj za injekcijsko prešanje

EVA mješavina dovodi se do ubrizgača koji može biti rotirajući ili višestruki jer je prosječni ciklus ubrizgavanja svakoga kalupa oko 7 minuta, tako da se strojem s više stanica može postići brža i učinkovitija proizvodnja (Ferreir et al., 2018.).

Koraci injekcijskog prešanja EVA (Ferreir et al., 2018.):

- (a) Smjesa se dodaje u spremnik ubrizgača (injektor jedinica za ubrizgavanje).
- (b) Volumen ubrizgavanja izračunava se i prilagođava prema kalupu.
- (c) Materijal se zagrijava do 95°C i ubrizgava u kalup pri tlaku od oko 1200 bara.
- (d) Kalup se zagrijava do 170°C da bi se aktivirao ekspander i uz istodobnu aktivaciju sredstava za umrežavanje elastomera.
- (e) Kalup je zatvoren pri temperaturi od 170°C dok se ne stvore sve elastomerne veze, brzinom stvaranja sloja od oko 1,5 min/mm.
- (f) Kalup se otvara i EVA potplat brzo izlazi iz šupljine te ekspandira.

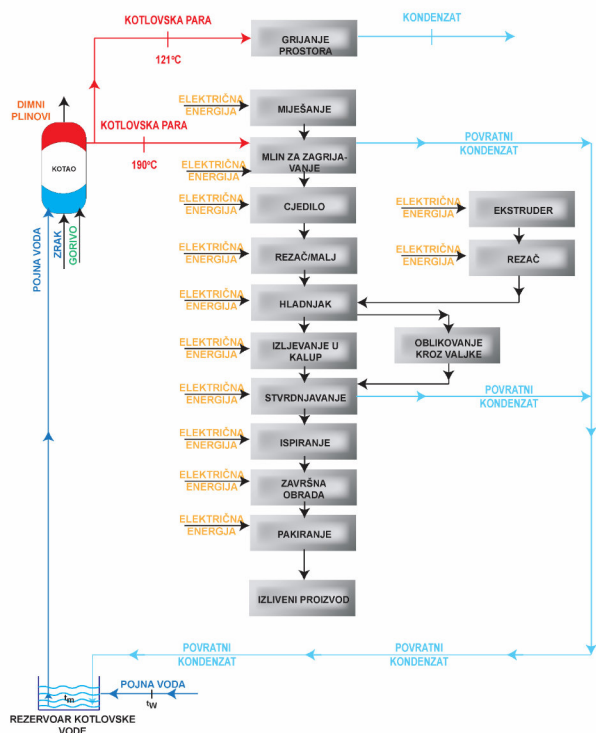
Tehnički opis odabranog automatskog stroja za injekcijsko prešanje Eva pjene i godišnja energetska analiza prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Tehnički opis automatskog stroja za injekcijsko prešanje

Tehnički opis	
Radne stanice	6
Sila stezanja (kg)	170000 – 230000
Hod otvaranja kalupa (mm)	350
Standardna debljina kalupa (mm)	100 – 210 – 230
Veličina ploče kalupa (mm)	2 (290*550)
Visina mlaznice za ubrizgavanje (mm)	60
Način grijanja	električno
Snaga grijanja (kW)	8.04
Sustav ubrizgavanja	
Ubrizgači (serija)	2
Promjer vijka (mm)	60/70
Duljina/debljina omjer vijka	23
Maksimalni kapacitet ubrizgavanja (cc)	920 – 1100
Injekcijski tlak	1100
Brzina ubrizgavanja (cm/sek)	10
Brzina okretanja vijka (okret u minuti)	0 – 190
Kontrola temperature (odjeljak)	4
Potrošnja električne energije	
Bačva za grijač (kW)	12.1
Motor za pomicanje ubrizgača (kW)	1.5
Ploča za grijanje kalupa (kW)	76.8
Hidraulički sustav (kW) (50 hz)	40.5
Vakuumska pumpa (kW)	2.2
Ventilator hlađenja cijevi (HP)	1
Ukupna električna energija (kW)	50/70/150
Veličina spremnika za ulje (L)	1000
Težina stroja (kg)	23800
Veličina stroja (m)	6.5*4.5*2.8
Izlaz (par/dan)	5000
Radno vrijeme (h/dan)	8
Mjesečno radno vrijeme (dani/mjesec)	25

1.2. ULAZNI PODATCI I ENERGETSKA ANALIZA TEHNOLOŠKOG PROCESA

Potrošnja energije u proizvodnji cipela provodi se sa stopom $n = 2500$ po smjeni (ili 5 000 parova na dan ili 625 parova na sat). Ova tehnologija (sl. 2.) uključuje procese u miješalici, mlinu za zagrijavanje, cjedilu, rezaču, ekstruderu, hladnjaku itd. Postrojenje radi 8 sati na dan, 25 dana u mjesecu ili $\tau = 2400$ sati na godinu, tj. $\beta = 27,4\%$. Za takav osnovni proces potrebno je električne energije $e_{el} = 3,44\text{ kWh}_e/\text{kg}$ proizvoda i suho zasićene pare (13 bar) mase $d_s = 14,870\text{ kg}_s/\text{kg}$ proizvoda. U procesu se upotrebljava i voda mase $d_w = 4,57\text{ kg}_w/\text{kg}$ proizvoda (Mihelić-Bogdanić i Budin, 2008.). Suha zasićena para nastaje u kotlu s učinkovitosti $\eta_B = 80\%$, izgaranjem nafte.



Slika 4. Dijagram toka proizvodnje potplata za cipele

Gorivo sastava (maseni postotci): C: H: N: S = 85,3 % : 11,6 % : 0,6 % : 2,5 % izgara s koeficijentom suvišnog zraka $\alpha = 1,25$. Dio zasićene pare $d_{SP} = 14,170 \text{ kg}_C/\text{kg}_P$ upotrebljava se za industrijski proces, a ostatak $d_{SH} = 0,7 \text{ kg}_C/\text{kg}_H$ za grijanje prostora. Donja toplinska vrijednost goriva jest $H_L = 41268 \text{ kJ/kg}$ (Mihelić-Bogdanić i Budin, 2008.). Pojna voda ulazi u kotao s temperaturom od $t_b = 25^\circ \text{C}$, a ukupni kondenzat s temperaturom $t_c = 121^\circ \text{C}$ izbacuje se u okolinu. Zrak potreban za izgaranje goriva prelazi u ložište s temperaturom $t_a = 25^\circ \text{C}$, dok je temperatura ispušnih plinova $t_{FG} = 221^\circ \text{C}$.

Toplina predana kotlu jest:

$$q_s = d_s(h_s - h_b) = 14,870 (2785 - 104,68) = 39856,36 \text{ kJ/kg}_P,$$

gdje su h_s i h_b entalpije pare i vode očitane iz termodinamičkih tablica (Mihelić-Bogdanić and Budin, 2008.).

Iz ovih podataka jedinična masa potrebe za naftom pomoću toplinske bilance jest:

$$d_F = q_s / H_L \times \eta_B = 39856,36 / 41268 \times 0,80 = 1,21 \text{ kg}_F/\text{kg}_P.$$

Specifična potrošnja pare jest:

$$d_{SP} = d_s / d_F = 14,870 / 1,21 = \text{kg}_S/\text{kg}_F,$$

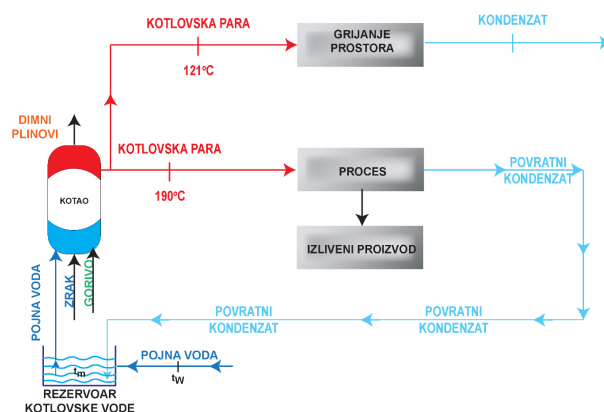
a potrošnja ulja jest:

$$d_{SF} = d_F / d_s = 1,21 / 14,870 = 0,0814 \text{ kg}_F/\text{kg}_S.$$

Uzimajući u obzir godišnje radno vrijeme $\tau = 2400$ sati i stopu proizvodnje potplata cipela $n = 625$ parova, potrošnja goriva jest:

$$D_{FY} = d_F \times \tau \times n = 1,21 \times 2400 \times 625 = 1,815 \times 10^6 \text{ kg}_F.$$

Ukupni kondenzat d_C iz procesa $d_{CP} = 14,170 \text{ kg}_C/\text{kg}_P$ i iz prostora za zagrijavanje $d_{CH} = 0,7 \text{ kg}_C/\text{kg}_H$ s temperaturom $t_c = 121^\circ \text{C}$ izbacuje se u okolinu (sl. 3.).



Slika 5. Povrat vrućega procesnoga kondenzata

Toplina kondenzata jest:

$$q_c = (d_{CP} + d_{CH}) h_{121} = (14,170 + 0,7) 507 = 7539,1 \text{ kJ/kg}_P.$$

Kako bi se poboljšala učinkovitost postupka (Lopez, 2014.), otpadni se kondenzat može primijeniti za predgrijavanje pojne vode.

2. ANALIZE PROIZVODA IZGARANJA

Produkti izgaranja goriva jesu plinovi (Eastop i McConkey, 1994.). Potpuno sagorijevanje goriva odvija se uz 25 % zraka. Minimalni volumen kisika $V_{O_2 \min}$ i stehiometrijski volumen zraka V_a koji je potreban za izgaranje izražava se kao:

$$V_{O_2 \min} = (22,4/12) \{C + 3[H - (o - s)/8]\} = 2,26 \text{ m}^3_{O_2}/\text{kg}_F$$

$$V_a = V_{O_2 \min} / 0,21 = 10,8 \text{ m}^3_a/\text{kg}_F.$$

Radi sigurnog potpunog sagorijevanja nafte uzet je koeficijent viška $\alpha = 1,25$.

Stvarni volumen zraka jest:

$$V_{aa} = V_a \times \alpha = 10,8 \times 1,25 = 13,5 \text{ m}^3_a/\text{kg}_F.$$

Ukupni volumen vlažnih dimnih plinova V_{FG} sastoji se od ugljičnog dioksida, sumpornog dioksida, dušika, viška kisika i vodene pare:

$$V_{FG} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O}.$$

Volumen svake komponente plina izračunava se s pomoću sljedećih izraza:

$$V_{CO_2} = (22,4/12)C = (22,4/12) 0,853 = 1,592 \text{ m}^3_{CO_2}/\text{kg}_F$$

$$V_{SO_2} = (22,4/32)S = (22,4/32) 0,025 = 0,0175 \text{ m}^3_{SO_2}/\text{kg}_F$$

$$V_{N_2} = (22,4/28)S + 0,79 \times V_{aa} = (22,4/28) 0,006 + 0,79 \times 13,5 = 10,67 \text{ m}^3_{N_2}/\text{kg}_F$$

$$V_{O_2} = 0,21 (\alpha - 1) V_a = 0,21 (1,25 - 1) 10,8 = 0,567 \text{ m}^3_{O_2}/\text{kg}_F$$

$$V_{H_2O} = (22,4/2)H + (22,4/18)W = (22,4/2) 0,116 + (22,4/18) 0 = 1,299 \text{ m}^3_{H_2O}/\text{kg}_F$$

i ukupni volumen dimnih plinova sa suviškom zraka jest:

$$V_{FG} = 14,1455 \text{ m}^3_{FG}/\text{kg}_F$$

Udio svakog sastojka izražen kao postotak ukupnih vlažnog dimnih plinova:

$$\text{CO}_2 : 11,25 \% ; \text{SO}_2 : 0,12 \% ; \text{N}_2 : 75,43 \% ; \text{O}_2 : 4,02 \% ; \text{H}_2\text{O} : 9,18 \%$$

Specifična toplina ispušnih plinova s temperaturom $t_{FG} = 221^\circ \text{C}$ i postotak volumena dimnih plinova kao i specifična toplina svakog plina izračunavaju se prema izrazu (Bošnjaković, 1971.):

$$c_{p,FG} = c_{p,CO_2} \times \% V_{CO_2} + c_{p,SO_2} \times \% V_{SO_2} + c_{p,N_2} \times \% V_{N_2} + c_{p,O_2} \times \% V_{O_2} + c_{p,H_2O} \times \% V_{H_2O} = 1,392 \text{ kJ/m}^3 \text{ grad.}$$

Energija koja se oslobađa pri potpunom izgaranju po jedinici mase goriva ili po jedinici proizvoda ovisi o ukupnom volumenu dimnih plinova, specifičnoj toplini i temperaturi dimnih plinova:

$$q_{FG} = V_{FG} \times c_{p,FG} \times t_{FG} = 14,1455 \times 1,392 \times 221 = 4351,61 \text{ kJ}_{FG}/\text{kg}_F$$

$$q_{FGP} = q_{FG} \times d_F = 4351,61 \times 1,21 = 5265 \text{ kJ}_{FG}/\text{kg}_P$$

Volumen ispušnih plinova po jedinici proizvoda izbačen u okolinu s temperaturom $t_{FG} = 221^\circ \text{C}$ jest:

$$V_{FGP} = V_{FG} \times d_F = 14,1455 \times 1,21 = 17,11 \text{ m}^3_{FG}/\text{kg}_P$$

3. OPTIMIZACIJA UŠTEDE ENERGIJE U PROIZVODNJI POTPLATA ZA CIPELE

3.1. POVRAT TOPLINE PROCESNOGA KONDENZATA

Povrat vrućega kondenzata u kotao odvija se radi uštede energije. Primjenom povratnoga kondenzata za zagrijavanje pojne vode potrebna je manja količina svježe vode, manja potrošnja goriva za proizvodnju pare iz tople vode umjesto hladne vode. Povrat kondenzata visoke čistoće, tj. destilirane vode smanjuje i troškove kemikalija i tretmana, kao i gubitke energije zbog propuhivanja kotla (Nautiyal, 2012.). U analiziranom tehnološkom procesu procesni se kondenzat vraća u količini od $d_{CR} = 14,170 \text{ kg}_C/\text{kg}_P$ s temperaturom od $t_C = 121^\circ \text{C}$ te miješa s pojnom vodom u količini od $d_W = 0,700 \text{ kg}_W/\text{kg}_P$ s temperaturom od $t_W = 25^\circ \text{C}$.

S obzirom na adijabatski postupak miješanja, pojna će voda ući u kotao s temperaturom:

$$t_m = (d_{CR} \times t_C + d_W t_W) / d_S = (14,170 \times 121 + 0,700 \times 25) / 14,870 = 116,48^\circ \text{C.}$$

Potrošnja goriva izračunava se u skladu s jednadžbom energetske ravnoteže:

$$d_{FC} = d_S (h_S - h_m) / H_L \times \eta_B = 14,870 (2785 - 492) / 41268 \times 0,8 = 1,03 \text{ kg}_F/\text{kg}_P$$

Specifična potrošnja pare jest:

$$d_{SPC} = d_S / d_{FC} = 14,870 / 1,03 = 14,44 \text{ kg}_S/\text{kg}_P$$

Godišnja potrošnja jest:

$$D_{FCY} = d_F \times n = 1,03 \times 2400 \times 625 = 1,545 \times 10^6 \text{ kg}_F$$

Toplina kondenzata za predgrijavanje pojne vode jest:

$$Q_C = d_C \times h_{121}^0 = 14,170 \times 507 = 7184,19 \text{ kJ}_C/\text{kg}_P$$

Primjena povratnoga kondenzata u komparaciji s procesom bez povrata topline kondenzata pokazuje uštedu goriva od:

$$S = (d_F - d_{FC}) / d_F = (1,21 - 1,03) / 1,21 = 0,1487 \text{ i. e. } 14,9 \%$$

Toplina kondenzata, koja se ispušta u okolinu, postaje:

$$q_{CH} = d_{CH} \times h_{121} = 0,7 \times 507 = 354,9 \text{ kJ}_C/\text{kg}_P$$

Dakle, toplinsko se onečišćenje smanjuje od 7539,1 kJ_C/kg_P do 354,9 kJ_C/kg_P ili 95,3 %.

U ovom radu analizira se volumen dimnih plinova po jedinici proizvoda koji se odbacuje u atmosferu s temperaturom $t_{FG} = 221^\circ \text{C}$ iz:

$$V_{FGC} = V_{FG} \times d_{FC} = 14,1455 \times 1,03 = 14,57 \text{ m}^3_{FG}/\text{kg}_P$$

Volumen ispušnih plinova smanjuje se od 17,11 $\text{m}^3_{FG}/\text{kg}_P$ do 14,57 $\text{m}^3_{FG}/\text{kg}_P$ ili 14,8 % (Špelić et al., 2019.)

3.2. PREDGRIJAVANJE POJNE VODE DIMNIM PLINOVIMA

Sažetak ulaznih podataka:

- učinkovitost ekonomajzera $\eta_E = 80 \%$
- temperatura vode na ulazu u ekonomajzer $t_{WEI} = 116,78^\circ \text{C}$
- volumen ispušnih dimnih plinova $V_{FG} = 14,1455 \text{ m}^3_{FG}/\text{kg}_F$
- temperatura dimnih plinova na ulazu u ekonomajzer $t_{FGEI} = 221^\circ \text{C}$
- specifična potrošnja pare $d_{SP} = 14,44 \text{ kg}_S/\text{kg}_F$
- specifična toplina vode $c_{p,H_2O} = 4,187 \text{ kJ/kg K}$
- specifična toplina dimnih plinova $c_{p,FG} = 1,392 \text{ kJ}_{FG}/\text{m}^3 \text{ deg}$
- masa suhe zasićene pare $d_S = 14,870 \text{ kg}_S/\text{kg}_P$
- entalpija pare $h_S = 2785 \text{ kJ/kg}$
- donja toplinska vrijednost goriva $H_L = 41268 \text{ kJ/kg}_F$

Hladna voda temperature $t_{WEI} = 116,78^\circ \text{C}$ ulazi u ekonomajzer gdje se zagrijava s pomoću dimnih plinova u količini $V_{FG} = 14,1455 \text{ m}^3_{FG}/\text{kg}_F$ s ulaznom temperaturom $t_{FGEI} = 221^\circ \text{C}$. Specifična potrošnja pare jest $d_{SP} = 14,44 \text{ kg}_S/\text{kg}_F$, specifična toplina vode jest $c_{p,H_2O} = 4,187 \text{ kJ/kg K}$ i specifična toplina dimnih plinova jest $c_{p,FG} = 1,392 \text{ kJ}_{FG}/\text{m}^3 \text{ deg}$, koje su prethodno izračunate.

Temperatura vode na izlazu iz ekonomajzera (t_{WEO}) računa se prema jednadžbi energetske ravnoteže:

$$V_{FG} \times c_{p,FG} \times (t_{FGEI} - t_{WEI}) \times \eta_E = d_{SP} \times c_{p,H_2O} \times (t_{WEO} - t_{WEI})$$

$$t_{WEO} = [V_{FG} \times c_{p,FG} \times (t_{FGEI} - t_{WEI}) \times \eta_E + d_{SP} \times c_{p,H_2O} \times t_{WEI}] / (d_{SP} \times c_{p,H_2O})$$

$$t_{WEO} = 143,71^\circ \text{C}$$

Temperatura dimnih plinova na izlazu iz ekonomajzera (t_{FGEo}) računa se prema izrazu:

$$V_{FG} \cdot c_{p,FG} \cdot (t_{FG,El} - t_{FG,EO}) = d_{SP} \cdot c_{p,H_2O} \cdot (t_{W,EO} - t_{W,El})$$

$$t_{FG,EO} = [d_{SP} \cdot c_{p,H_2O} \cdot (t_{W,EO} - t_{W,El}) - V_{FG} \cdot c_{p,FG} \cdot t_{FG,El}] / V_{FG}$$

$$t_{FG,EO} = 137,39^\circ C$$

Potrošnja goriva jest:

$$d_{FE} = d_s \cdot (h_s - h_{W,EO}) / \eta_B \cdot H_L = 14,870 \cdot (2785 - 601,7) / 0,8 \cdot 41268 = 0,983 \text{ kg}_F / \text{kg}_P$$

gdje su h_s i $h_{W,EO}$ entalpije pare i vode.

Usporedba procesa s povratom topline dimnih plinova i bez njega pokazuje uštedu goriva:

$$S_1 = (d_F - d_{FE}) / d_F = (1,21 - 0,983) / 1,21 = 0,1876 \text{ i. e. } 18,76 \%$$

Količina dimnih plinova odbačenih u atmosferu jest:

$$V_{FG,E} = V_{FG} \cdot d_{FE} = 14,1455 \cdot 0,983 = 13,90 \text{ m}^3_{FG} / \text{kg}_P$$

ZAKLJUČAK

Izračunavanje uštede energije u pogonima za preradu gume vrlo je važno jer sintetička guma čini većinu proizvodnje gume. Većina potplata danas je napravljena od etilen vinil acetata (EVA). U ovom radu analiziran je potencijal uštede energije primjenom procesa povratnoga kondenzata i predgrijavanja pojne vode primjenom povrata topline dimnih plinova u procesu proizvodnje EVA potplata. Uštede energije vidljive su kroz manju potrošnju vode, znatnu uštedu goriva i manju potrošnju kemikalija. Vraćanjem kondenzata topline u kotao rezultira uštedom goriva od 14,9 %, toplinsko onečišćenje se smanjuje 95,3 %, dok se volumen dimnih plinova smanjuje sa 17,11 $\text{m}^3_{FG}/\text{kg}_{NEC}$ na 14,57 $\text{m}^3_{FG}/\text{kg}_{NEC}$ ili 14,8 %. Također, primjenom povrata topline dimnih plinova za predgrijavanje pojne vode može se poboljšati tehnološki proces. Primjenom prikazane metode primjenom dimnih plinova povećava se temperatura vode na ulazu u kotao.

ZAHVALA

Ovaj je rad financiran projektom HRZZ IP-06-2016 5278: Udobnost i antimikrobna svojstva tekstila i obuće (ComforMicrobTexFoot).

REFERENCE

- [1] Landrock, Arthur H. 1995. Handbook of plastic foams – types, properties, manufacture and applications. Noyes Publications.
- [2] Groover, M. P. 2010. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems. 4th edition, John Wiley & Sons Inc.
- [3] Karkalića, R. M.; Radulović, J. R.; Jovanović, D. B. 2017. Characteristics of polyurethane and elastomer parts for shoe industry produced by liquid injection molding technology. Vojnotehnički glasnik, vol. 65, br. 4, str. 948 – 967 <http://dx.doi.org/10.5937/vojtehg65-10543>.
- [4] Chung, T. C. Mike. 2002. Functionalization of Polyolefins. 1st edition, Academic Press.
- [5] Brito e Dias, R.; Coto, N. P.; Batalha, G. F.; Driemeier, L.

2018. Systematic Study of Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) in the Manufacturing of Protector Devices for the Orofacial System, Chapter 14, Biomaterials in Regenerative Medicine, ISBN: 978-953-51-3777-1.

- [6] Shi, X. M.; Zhang, J.; Jin, J.; Chen, S. J. 2008. Non-isothermal crystallization and melting of ethylene-vinyl acetate copolymers with different vinyl acetate contents. eXPRESS Polymer Letters Vol. 2, No. 9, 623 – 629, DOI: 10.3144/expresspolymlett.2008.75
- [7] Jeng, Y. -R.; Liu D. -S. and Yau, H. -T. 2012. Designing Experimental Methods to Predict the Expansion Ratio of EVA Foam Material and Using Finite Element Simulation to Estimate the Shoe Expansion Shape. Materials Transactions, Vol. 53, No. 9, pp. 1685 to 1688.
- [8] Nautiyal, O. H. 2012. Molding of EVA Soles Using Expanding and Reducing Agents. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 4 No. 07, pp. 3050 – 3058.
- [9] López, L. C. 2014. Polymer injection moulding for shoe soles production. M. Sc. Thesis, Vilnius Gediminas technical university faculty of mechanics.
- [10] Ferreir, E. J.; Dias, M. M.; Schneider, E. L. 2018. Analysis of Non-Uniform Expansion Behavior of Injected EVA. Academ J Polym Sci.; 1(4): 555569.
- [11] Mihelić-Bogdanić, A.; Budin, R. 2008. Investigation on energy conservation in thermoplastics production, Energy conversion and management, 49, 8; 2200 – 2206, doi:10.1016/j.enconman.01.028
- [12] Eastop, T. D.; McConkey, A. 1994. Applied Thermodynamics for Engineering Technologists. 5th ed. New York: Longman Scientific & Technical, John Wiley & Sons.
- [13] Bošnjaković, F. 1971. Technische Thermodynamik. Dresden: Verlag T. Steinkopff.
- [14] Wang, L.; Hong, Y.; Li, J. X. 2012. Durability of running shoes with ethylene vinyl acetate or polyurethane midsoles. Journal of Sports Sciences, 30, 16, 1787 – 1792, doi:10.1080/02640414.2012.723819
- [15] Lopes, D.; Ferreira, M. J.; Russo, R.; Dias, J. M. 2015. Natural and synthetic rubber / waste – EVA (EthyleneVinyl Acetate) composites for sustainable application in the footwear industry. Journal of Cleaner Production, 92, 230 – 236, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.063>
- [16] Fuss, F. K.; Subic, A.; Strangwood, M.; Mehta, R. 2014. Routledge Handbook of Sports Technology and Engineering. Routledge, Taylor and Francis, ISBN 9780415580458
- [17] Špelić, I.; Mihelić-Bogdanić, A.; Budin, R. Energy savings in shoe sole production process. In: Book of Proceedings of the 12th International Scientific-Professional Symposium Textile Science and Economy, French-Croatian Forum, 23. do 24. siječnja 2019. Zagreb. Hrvatska, pp. 245 – 254.