

Izvješće:
Analiza potrošnje energije
HRZZ UIP projekt ANTYARD

ZAGREB 2023.

SADRŽAJ

1. POTROŠNJA ENERGIJE	3
1.1 Potrošnja energije linije predobrade	3
1.2 Potrošnja energije linije obrade	4
1.3 Potrošnja energije okrupnjavanja	5
2. PRIMJER.....	7
3. ZAKLJUČAK.....	13
Literatura.....	14

1. POTROŠNJA ENERGIJE

Potrošnja energije se pojavljuje u svakom postupku obrade sirovina ili poluproizvoda koja se mora pravovremeno osigurati kako bi se proizvodni proces mogao nesmetano odvijati. Stoga je postupak određivanja potrošnje energije od velike važnosti.

Brodograđevni proces je složen što se i odražava na postupak određivanja potrošnje energije. Ovaj izvještaj obuhvaća izraze za određivanje potrošnje energije u predobradi, obradi i okrupnjivanju limova i profila [1, 2].

1.1 Potrošnja energije linije predobrade

Potrošnja energije za ravnanje temelji se na energiji utrošenoj za rad valjaka za ravnanje materijala kojima se ciljano induciraju plastične i elastične deformacije limova, a može se odrediti kao

$$E_{EN,i}^R = k \frac{Re_i}{2r_{min,i}} l_v (S_i + W_i n_{el}), \quad (1)$$

gdje su k , Re_i , l_v , $r_{min,i}$, S_i i W_i koeficijent, granica razvlačenja, udaljenost između valjaka, najmanji polumjer zakrivljenosti deformacija, statički moment površine i moment otpora i-te jedinice materijala i n_{el} broj segmenata ravnanja u elastičnom području

Potrošnja energije za sušenje se može svesti na potrošnju energije kisika i acetilena, odnosno vrijedi

$$E_{EN,i}^{O_2} = \frac{p^{O_2}}{p_0} \bar{V}^{O_2} P^{O_2} t_i^S, \quad (2)$$

$$E_{EN,i}^{C_2H_2} = \frac{p^{C_2H_2}}{p_0} \bar{V}^{C_2H_2} t_i^S E^{C_2H_2}, \quad (3)$$

gdje je p^{O_2} tlak kisika, p_0 atmosferski tlak, \bar{V}^{O_2} volumenski protok kisika, P^{O_2} specifična snaga postrojenja za proizvodnju kisika po jedinici volumena kisika u normalnom stanju, t_i^S vrijeme sušenja, t^{O_2} vrijeme proizvodnje kisika, $p^{C_2H_2}$ tlak acetilena, $\bar{V}^{C_2H_2}$ volumenski protok acetilena i $E^{C_2H_2}$ specifična energija po jedinici volumena acetilena.

Potrošnja energije za abrazivno čišćenje uključuje rad kola rotora za abrazivno čišćenje iz čije nazivne snage slijedi da je

$$E_{EN,i}^A = \frac{l_i}{v_i^A} P_K n_K, \quad (4)$$

gdje je l_i duljina i-te jedinice materijala, v_i^A brzina čišćenja po jedinici duljine, P_K snaga kola rotora i n_K broj kola rotora.

Potrošnja energije za primarnu antikorozivnu zaštitu u obzir uzima nazivnu snagu elektromotora za pogon pumpi premaza te vrijedi

$$E_{EN,i}^{PAKZ} = \frac{A_i}{v_i^{PAKZ}} P_{PAKZ}, \quad (5)$$

gdje je A_i površina i-te jedinice materijala, v_i^{PAKZ} brzina antikorozivne zaštite po jedinici površine i P_{PAKZ} snaga elektromotora za pogon pumpi i gibanje mlaznica.

1.2 Potrošnja energije linije obrade

Potrošnja energije za plinsko rezanje, slično energiji za sušenje materijala u obzir uzima specifičnu energiju potrebnu za proizvodnju kisika i acetilena u kisikani, odnosno acetilenskoj stanici brodogradilište. Stoga slijedi da je

$$E_{EN,i}^{PR,O_2} = k \frac{P^{O_2}}{p_0} \bar{V}^{O_2} P^{O_2} t_i^R t^{O_2}, \quad (6)$$

$$E_{EN,i}^{PR,C_2H_2} = k \frac{P^{C_2H_2}}{p_0} \bar{V}^{C_2H_2} t_i^R E^{C_2H_2}, \quad (7)$$

gdje je t_i^R vrijeme rezanja zadano brzinom rezanja i duljinom putanje mlaznice.

Potrošnja energije za plazma rezanje podrazumijeva zbroj specifičnih snaga potrebnih za proizvodnju primarnih i sekundarnih plinova kao i napon te snagu struje za održavanje električnog luka, odnosno iznosi

$$E_{EN,i}^{PLAZMA} = k \left(\frac{P^P}{p_0} \bar{V}^P P^P t^P + \frac{P^S}{p_0} \bar{V}^S P^S t^S + IU \right) t_i^R, \quad (8)$$

gdje su p^P i p^S tlak, \bar{V}^P i \bar{V}^S volumenski protok, P^P i P^S specifična snaga postrojenja po jedinici volumena u normalnom stanju, t^P i t^S vrijeme proizvodnje primarnog, odnosno sekundarnog plina, I jakost struje, a U napon.

Potrošnja energije za oblikovanje – elastično plastično, slično ravnanju limova, u obzir uzima rad velikih valjaka za oblikovanje limova,

$$E_{EN,i}^O = E_{EN,i}^{O,E-P} = k \frac{\text{Re}_i (W_i^{el} + S_i^{pl})}{r_{n,j}} L_i, \quad (9)$$

gdje je $E_{EN,i}^{O,E-P}$ energija elastično-plastičnog oblikovanja, $k = 1.4$, [4.8], a W_i^{el} , S_i^{pl} , $r_{n,j}$ i L_i su redom moment otpora poprečnog presjeka u elastičnom području, statički moment površine poprečnog presjeka u plastičnom području, polumjer zakrivljenosti neutralne linije i duljina obradka.

Potrošnja energije za oblikovanje – plastično se temelji na radu preša za oblikovanje odnosno na empirijskom izrazu

$$E_{EN,i}^O = E_{EN,i}^{O,P} = k \frac{n R m_i \frac{B_i t_i^2}{4}}{r_{n,j}} L_i, \quad (10)$$

gdje je $E_{EN,i}^{O,P}$ energija plastičnog oblikovanja, $n = 1.6 \div 1.8$, R_m vlačna čvrstoća, B širina i t debljina obradka.

1.3 Potrošnja energije okrupnjavanja

Potrošnja energije za zavarivanje j-tog spoja uključuje napon i jakost struje kao i vrijeme trajanja zavarivanja u ovisnosti o duljini svakog zavara. Potrošnja Energije za zavarivanje j-tog spoja i-te građevne jedinice, $E_{EN,i,j}^{ZAV}$, proizlazi iz razmatranja fizikalnih karakteristika REL, MIG, MAG i EPP postupaka, odnosno vrijedi da je

$$E_{EN,i,j}^{ZAV} = I_j U t_j^{ZAV}, \quad (11)$$

gdje je I_j jakost truje zavarivanja, U napon i t_j^{ZAV} vrijeme zavarivanja.

Potrošnja energije za brušenje j-tog spoja proizlazi iz izraza za snagu brušenja, te je jednaka

$$E_{EN,i,j}^{BR} = \frac{F_j v_b}{\eta} t_j, \quad (12)$$

gdje su F_j , v_b , t_j i η redom obodna sila, obodna brzina diska, vrijeme brušenja i korisnost provedbe postupka.

Potrošnja energije za ravnanje višeplamenim plamenikom, prema analogiji s izrazima (2) i (3), obuhvaća potrošnju kisika, $E_{EN,i,j}^{RAV,O_2}$, i acetilena, $E_{EN,i,j}^{RAV,C_2H_2}$, za ravnanje strukturnih elemenata u okolici j-tog spoja i-te građevne jedinice, odnosno

$$E_{EN,i,j}^{RAV,O_2} = \frac{P^{RAV,O_2}}{p_0} \bar{V}^{RAV,O_2} P^{O_2} t_{i,j}^{RAV} t^{O_2}, \quad (13)$$

$$E_{EN,i,j}^{RAV,C_2H_2} = \frac{P^{RAV,C_2H_2}}{p_0} \bar{V}^{RAV,C_2H_2} t_{i,j}^{RAV} (\bar{V}^{H_2O} + m^{CaC_2} + E^{C_2H_2}), \quad (14)$$

gdje su p^{RAV,O_2} i p^{RAV,C_2H_2} tlak kisika i acetilena, \bar{V}^{RAV,O_2} i \bar{V}^{RAV,C_2H_2} volumenski protok kisika i acetilena, a $t_{i,j}^{RAV}$ vrijeme potrebno za ravnanje.

Potrošnja energije za sekundarnu antikoroziivnu zaštitu

Trošak energije sekundarne antikoroziivne zaštite i-te građevne jedinice, $E_{EN,i}^{SAKZ}$, obuhvaća energiju potrebnu za provedbu abrazivnog čišćenja i energiju potrebnu za prskanje premaza, odnosno vrijedi da je

$$E_{EN,i}^{SAKZ} = \left(\frac{P_{KOM}}{v_i^A} + \frac{P_{SAKZ}}{v_i^{SAKZ}} \right) A_i, \quad (15)$$

gdje je P_{KOM} snaga kompresora za pneumatski postupak, P_{SAKZ} snaga hidrauličkih pumpi premaza, a v_i^A i v_i^{SAKZ} brzine čišćenja i prskanja izražene po jedinici površine građevne jedinice, A_i .

Ukupna potrošnja energije za okrupnjavanje

Ukupna potrošnja energije za okrupnjavanje i-te građevne jedinice broskog trupa, $E_{EN,i}^{OK}$, slijedi objedinjavanjem izraza (11) – (15) te vrijedi da je

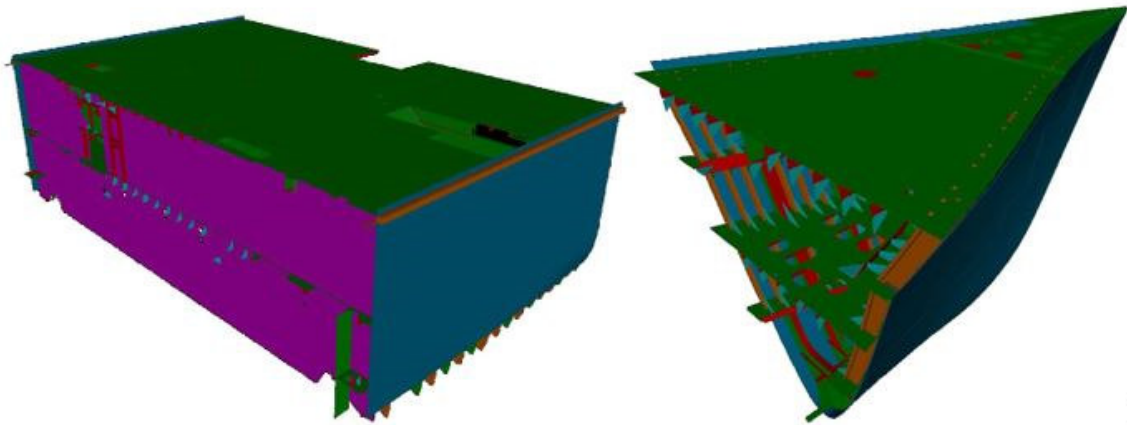
$$E_{EN,i}^{OK} = E_{EN,i}^{SAKZ} + \sum_j E_{EN,i,j}^{ZAV} + E_{EN,i,j}^{BR} + E_{EN,i,j}^{RAV}. \quad (16)$$

2. PRIMJER

U ovom primjeru se određuju potrošnja energije za predobradu i obradu limova i profila na primjeru jedne srednje sekcije A i jedne pramčane sekcije B, slika 1, čije karakteristike su popisane u tablici 1, [3].

Tablica 1 Karakteristike sekcija A i sekcije B, [3]

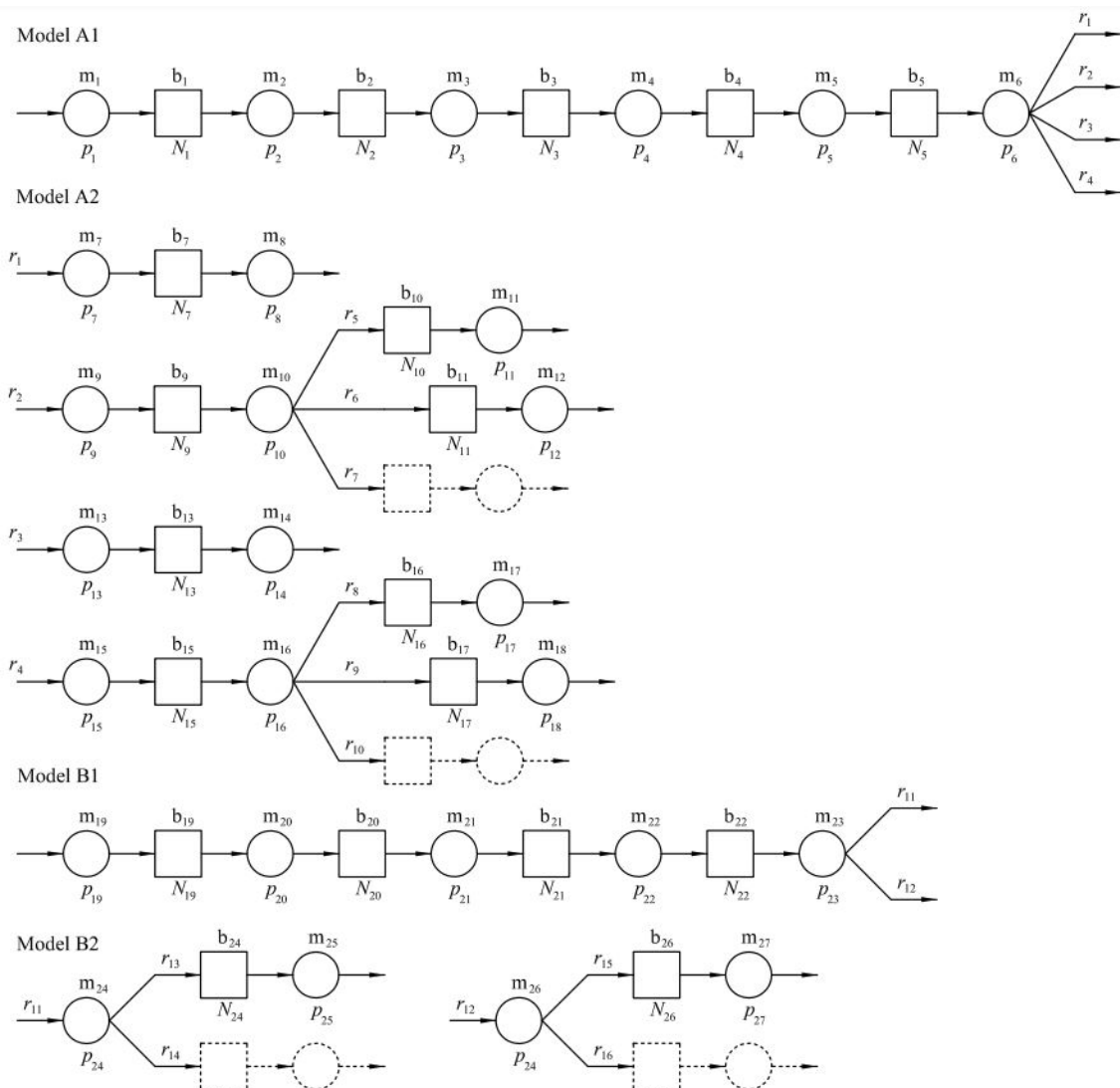
Karateristike		Sekcija		Ukupno A+B	Prosjek (A+B)/2
		A	B		
Broj ulaznih limova	B_{KL} [kom]	50	30	80	-
Broj elementa iz limova	B_{EL} [elem]	982	546	1528	-
Broj elementa iz jednog lima	λ_L [e/k]	19.64	18.20	-	19.10
Broj elementa za oblikovanje veliki valjak	B_{EV} [elem]	6	18	24	-
Broj elementa za oblikovanje H-preša	B_{EH} [elem]	0	18	18	-
Prosječna duljina jednog lima	\bar{L} [m]	8.44	7.01	-	7.72
Prosječna širina jednog lima	\bar{B} [m]	2.32	2.32	-	2.32
Prosječna površina jednog lima	\bar{A} [m ²]	19.54	16.23	-	17.88
Minimalna debljina lima	t_{min} [mm]	6	5	-	6
Maximalna debljina lima	t_{max} [mm]	25	26	-	26
Prosječna debljina lima	\bar{t} [mm]	11.59	15.50	-	13.55
Broj ulaznih profila	B_{KP} [kom]	144	40	184	-
Broj elementa iz profila	B_{EP} [elem]	722	260	982	-
Broj elementa iz jednog profila	λ_P [e/k]	5.01		-	5.34
Broj elementa za oblikovanje	B_{EPO} [elem]	54	95	149	-
Prosječna duljina jednog profila	\bar{L}_P [m]	11.79	11.92	-	11.85
Minimalna visina jednog profila	H_{min} [mm]	50	100	-	75
Maximalna visina jednog profila	H_{max} [mm]	260	320	-	290
Prosječna visina jednog profila	\bar{H} [mm]	155	210	-	182.50



Slika 1 Sekcije A i B, [3]

Proračun potrošnje energije za sekcije A i B se temelji na modelima predobrade i obrade limova i profila jednog brodogradilišta prikazane na slici 2 i izrazima iz poglavlja 1 ovog priručnika. Nazivi svih strojeva prikazani u modelima se nalaze u tablici 2.

Kratkom analizom podataka iz tablice 1 vidljivo je da nema potrebe za strojevima plinskog rezanja limova (m_{13} , m_{14} , m_{15} , m_{16}) i robotiziranog rezanja profila (m_{26}), zato se za te strojeve neće računati potrošnja energije.



Slika 2 Modeli proizvodnih linija, A1 i A2 za izradu plošnih elementa, modeli proizvodnih linija B1 i B2 za izradu profilnih elementa [3]

Tablica 2 Popis strojeva, m_i [3]

i	m_i	Model	Naziv operacije	
1	m_1	A1	Ravnanje lima	
2	m_2		Sušenje	
3	m_3		Abrazivno čišćenje	
4	m_4		Primarna antikorozivna zaštita	
5	m_5		Sušenje	
6	m_6		Ručno označavanje	
7	m_7	A2	Rezanje i označavanje limova plazmom	
8	m_8		Ručno označavanje	
9	m_9		Rezanje i označavanje limova plazmom	
10	m_{10}		Ručno označavanje	
11	m_{11}		Oblikovanje lima – veliki valjak	
12	m_{12}		Oblikovanje lima – hidraulička preša	
13	m_{13}		Plinsko rezanje i označavanje limova	
14	m_{14}		Ručno označavanje	
15	m_{15}		Plinsko rezanje i označavanje limova	
16	m_{16}		Ručno označavanje	
17	m_{17}		Oblikovanje lima – veliki valjak	
18	m_{18}		Oblikovanje lima – hidraulička preša	
19	m_{19}		B1	Sušenje
20	m_{20}			Abrazivno čišćenje
21	m_{21}			Primarna antikorozivna zaštita
22	m_{22}			Sušenje
23	m_{23}			Ručno označavanje
24	m_{24}			B2
25	m_{25}	Oblikovanje profila		
26	m_{26}	Robotizirano rezanje profila		
27	m_{27}	Oblikovanje profila		

Tablica 3 Rezultati potrošnje energije po korištenim strojevima

<i>i</i>	<i>m_i</i>	Model	Naziv operacije	<i>E_i</i> [kWh]	<i>E_{Model}</i> [kWh]	<i>E_{elem}</i> [kWh]
1	m ₁		Ravnanje lima	0.152		
2	m ₂		Sušenje potrošnja kisika	8.042		
	m ₂		Sušenje potrošnja acetilena	0.108		
3	m ₃	A1	Abrazivno čišćenje	617.772	1028.184	12.852
4	m ₄		Primarna antikorozivna zaštita	402.110		
5	m ₅		Sušenje	-		
6	m ₆		Ručno označavanje	-		
7	m ₇		Rezanje i označavanje limova plazmom	885.592	885.592	22.140
8	m ₈		Ručno označavanje	-		
9	m ₉		Rezanje i označavanje limova plazmom	885.592		22.140
10	m ₁₀		Ručno označavanje	-	889.518	
11	m ₁₁		Oblikovanje lima – veliki valjak	1.147		0.574
12	m ₁₂	A2	Oblikovanje lima – hidraulička preša	2.779		1.389
13	m ₁₃		Plinsko rezanje i označavanje limova	np**		
14	m ₁₄		Ručno označavanje	np**		
15	m ₁₅		Plinsko rezanje i označavanje limova	np**		
16	m ₁₆		Ručno označavanje	np**		
17	m ₁₇		Oblikovanje lima – veliki valjak	np**		
18	m ₁₈		Oblikovanje lima – hidraulička preša	np**		
19	m ₁₉		Sušenje potrošnja kisika	1.569		
	m ₁₉		Sušenje potrošnja acetilena	0.047		
20	m ₂₀	B1	Abrazivno čišćenje	272.621	350.866	15.255
21	m ₂₁		Primarna antikorozivna zaštita	76.628		
22	m ₂₂		Sušenje	-		
23	m ₂₃		Ručno označavanje	-		
24	m ₂₄		Ručno rezanje profila potrošnja kisika	882.581		4.797
	m ₂₄		Ručno rezanje profila potrošnja acetilena	0.103	890.648	0.001
25	m ₂₅	B2	Oblikovanje profila	7.964		0.215
26	m ₂₆		Robotizirano rezanje profila	np**		
27	m ₂₇		Oblikovanje profila	np**		
*	[sek/cikl]			ukupno:	4044.807	79.362
**	nema podataka/nije potrebno					

Tablica 4 Rezultati potrošnje energije prema PR, broju gotovih proizvoda po ciklusu

Model	Grana	$E_{elemizl}$ [kWh]	PR	E_{elemPR} [kWh kom/ciklus]
A1	-	12.852	0.77	9.896
A2r1	-	22.140	0.65	14.391
A2r2	r5	22.713	0.04	0.909
	r6	23.529	0.04	0.941
	r7	22.140	0.64	14.169
B1	-	15.255	0.77	11.746
B2	r13	5.012	0.15	0.752
	r14	4.797	0.61	2.926

3. ZAKLJUČAK

Analiza potrošnje energije u brodograđevnoj proizvodnji je u začetku, te se temelj na izračunu energije po stroju za razmotreni proizvodni pogon i program. Jednom kada se izračuna potrošnja energije po stroju moguće je izračunati potrošnju energije za svaki gotovi proizvod što omogućuje povezivanje s ključnom značajkom broju gotovih proizvoda po ciklusu, PR . Novo formiranom ključnom značajkom, potrošnja energije jednog komada po ciklusu, PRE , može se analizirati utjecaj pouzdanost rada strojeva i kapaciteta međuskladišta na raspodjelu potrošnje energije. Što je broj gotovih proizvoda veći, to se broj ciklusa smanjuje te time povećava potrebu energije po ciklusu i obrnuto. Bitno je naglasiti da novonastala ključna značajka PRE ne utječe na ukupnu potrebnu potrošnju energije nego samo ukazuje na prosječnu potrošnju energije po ciklusu i zajedno sa brojem ciklusa daje operateru informaciju o vremenskom okviru u kojem će se potrošiti predviđena energija.

LITERATURA

- [1] Hadžić N. Tehnologija brodogradnje I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [2] Hadžić N. Tehnologija brodogradnje III, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [3] Ložar V. Razvoj simulacijskoga modela za određivanje ključnih značajki linija obrade brodogradilišta, Doktorski rad, Zagreb, 2023.