

EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA NA FIZIKALNOME MODELU PELTONOVE TURBINE

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON THE PHYSICAL MODEL OF THE PELTON TURBINE

Stjepan Komljenović*, Elvis Žic*, Saša Laloš**

Sažetak

U radu je opisan princip rada fizikalnog modela GUNT HM 289, eksperimentalnog uređaja Peltonove turbine izrađenog u Laboratoriju za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. U sklopu rada na fizikalnome modelu provedena su četiri osnovna eksperimentalna mjerenja: a) određivanje ovisnosti promjene dolazne brzine na lopatice okretnog kola i okretnog momenta o varijabilnosti hidrodinamičkog tlaka, b) određivanje ovisnosti promjena radnog tlaka o varijaciji dolaznog protoka reguliranom s pomoću igličastog ventila, c) definiranje krivulja okretnog momenta, d) određivanje mehaničke i hidrauličke snage i učinkovitosti rada Peltonove turbine ovisne o varijabilnostima radnog tlaka i rotacijske brzine.

Ključne riječi: Peltonova turbina, fizikalni model, hidraulička analiza

Abstract

The paper describes the working principle of the physical model GUNT HM 289, which represents the Pelton turbine experimental device done in the Laboratory for Hydraulic Engineering at the Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka. As part of the work on the physical model, four basic measurements were conducted: a) obtaining the changes of the incoming speed on the blades of a rotating wheel and torque depending on the variability of hydrodynamic pressure, b) determining the changes of the operating pressure depending on the variation of the incoming volume flow controlled by a needle valve, c) defining torque curves and d) determining the mechanical and hydraulic power and efficiency of the Pelton turbine depending on the variabilities of operating pressure and rotational speed.

Key words: Pelton turbine, physical model, hydraulic analysis

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: stjepan.komljenovic@student.uniri.hr; elvis.zic@uniri.hr

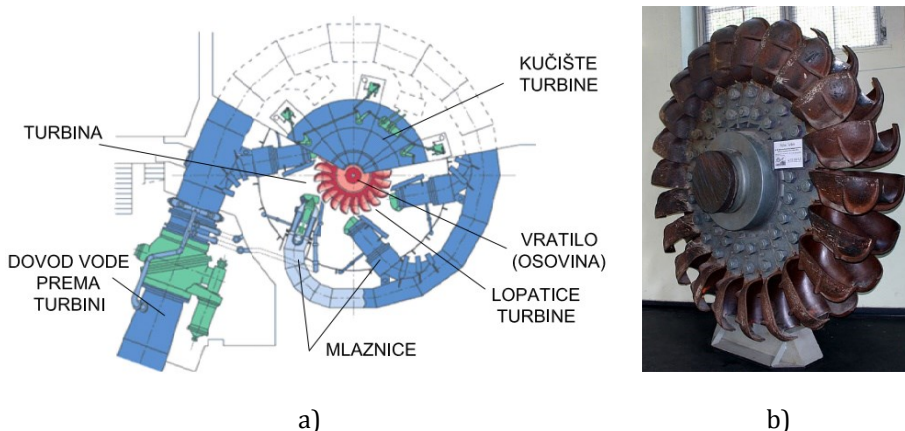
** Strojarski fakultet u Banja Luci, Bulevar vojvode Petra Bojovića 1A, 78000 Banja Luka

E-mail: sasa.lalos@unibl.rs

1. Uvod

Turbina predstavlja rotacijski motor koji izdvaja energiju iz tekućine ili protoka zraka i pretvara u koristan rad [3,7]. Najjednostavniji oblici turbina imaju jedan pomični dio (s 12-40 lopatica), a to je vratilo ili bubanj s lopaticama. Svaka je lopatica oštrim bridom podijeljena u dva jednaka ovalna dijela. Rotor turbine može biti postavljen na horizontalno ili vertikalno vratilo (osovinu), na kojemu mogu biti postavljeni jedan ili dva rotora. Postavljanje više rotora na vertikalno vratilo zahtijeva pažljivu konstrukciju kako gornji rotor ne bi hidrodinamički narušavao rad donjeg rotora. Protok tekućine djeluje na lopatice tako da se okreću i daju energiju rotacije na rotor. Rani su primjeri turbina vjetrenjače i vodeni mlinovi [1,4]. Najznačajniji predstavnici turbina koji koriste vodu kao fluid jesu: Peltonova turbina (vrsta impulsne vodene turbine), Francisova turbina (najčešće korištena turbina u praksi), Kaplanova turbina (varijacija Francisove turbine) te Voithova vodena turbina.

Peltonova je turbina vodna turbina koja se koristi velikim padovima (preko 200 m) i manjim protocima vode, a u odnosu prema ostalim turbinama ima najveći stupanj učinkovitosti (Slika 1). Ona nije potopljena u vodi, već se lopatice okreću u zraku. Maksimalna je proizvedena snaga turbine oko 200 MW [2]. Izumio ju je Lester Allan Pelton 1878. godine sasvim slučajno, promatrajući vodeničko kolo kojemu je osovina ispala iz ležaja i lagano se nagnula. Zbog udaranja mlaza vode malo sa strane u lopatice vodeničko kolo počelo se brže okretati nego prije. Promatrajući tu pojavu Pelton je shvatio da će dobiti bolje rezultate ako postavi mlaz vode koji udara sa strane, čime voda napušta lopatice ne sudarajući se s nadolazećim mlazom vode.

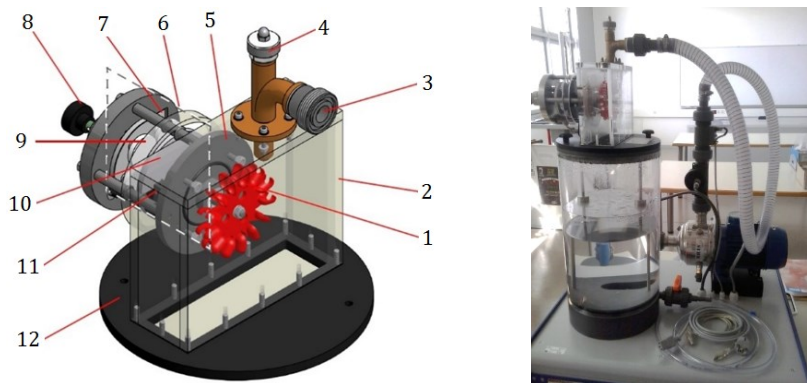


Slika 1. a) tlocrt ugradnje Peltonove turbine, b) stara Peltonova turbina iz hidroelektrane Walchensee, Njemačka [2]

Peltonova je turbina glavni predstavnik turbina slobodnog mlaza ili akcijskih turbina [1,2]. Geometrija je lopatica tako podešena da se one okreću s pola brzine mlaza vode, te se iskorištava gotovo sva količina gibanja mlaza vode (Slika 1).

2. Opis fizikalnog modela

Fizikalni model HM 289 predstavlja demonstratorski eksperimentalni uređaj Peltonove turbine kao dio uređaja firme GUNT koji se opskrbljuje vodom, a nalazi se u Praktikumumu za hidrotehniku u sklopu Laboratorija za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci (Slika 2). Model je opremljen elektroničkim sensorima koji se baziraju na mjerenju i prikupljanju podataka, te je omogućeno računalno upravljanje sensorom. Prilikom rada na modelu sva se mjerenja mogu prikazivati grafički i tablično, odnosno mjerne se fizikalne veličine mogu pohraniti posebnim programom [5]. Za nesmetani rad na modelu HM 289 potrebno je instalirati radnu jedinicu HM 290, koja služi za napajanje i dovod vode na lopatice turbine te računalo korisnika. Radna jedinica HM 290 sastoji se u pravilu od pokretača s kočnicama montiranim na prirubnice, priključka za crijevo i osnovnog stanka. Brzina i okretni moment mjere se pri samom radu turbine. Opskrbni tlak i količina protoka mjere se direktno na radnoj jedinici HM 290 [5].

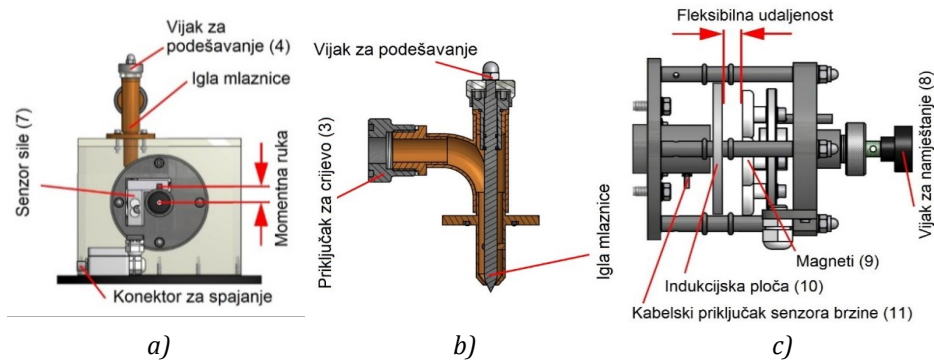


Slika 2. Fizikalni model HM 289 Peltonove turbine [5]

1 – rotor, 2 – prozirno kućište, 3 – priključak crijeva za dovod vode, 4 – vijak za podešavanje igle mlaznice, 5 – prirubnica s ležajevima za osovinu rotora, 6 – jedinica za kočenje u skladu s metodom vrtložnih struja, 7 – senzor sile, 8 – vijak za podešavanje momenta kočenja, 9 – magneti, 10 – indukcijska ploča s crnim / bijelim bojama, 11 – senzor brzine (optički), 12 – osnovna ploča za montažu na radnu jedinicu HM 290

Karakteristične krivulje i operativne točke mogu se zabilježiti tako da se korištenjem kočnice omogući odstupanje (promjena) momenta kočenja, odnosno da se korištenjem igle ventila smanji (regulira) količina protoka. Fizikalni model HM 289 za proizvodnju energije dizajniran je tako da se postavlja na vrh radne jedinice HM 290, te oni zajedno u potpunosti čine funkcionalnu jedinicu (Slika 2).

Turbinska jedinica za napajanje prikazana na Slici 3 sastoji se od pokretača (rotora) Peltonove turbine (1), priključka za crijevo (3), jedinice za kočenje (6) sa senzorom za mjerenje sile (7) i senzora za brzinu (11). Sve komponente nalaze se na stabilnoj osnovnoj ploči (12), koja se nalazi na spremniku radne jedinice HM 290 i pričvršćena je s dva vijka. Voda se opskrbljuje s pomoću radnog tlaka, te se količina protoka mjeri s pomoću jedinica za napajanje.



Slika 3. a) bočni pogled fizikalnog modela HM 289, b) presjek kroz iglu mlaznice, c) pogled na jedinicu za kočenje (modificirano prema [5])

Turbina se sastoji od dvije glavne komponente:

- transparentnoga turbinskog kućišta (2), koje sadrži kružni rotor turbine (tzv. okretno kolo) (1). On je montiran na osovinu okretnog kola koji je vođen od ležaja prema prirubnici (5). Voda prolazi kroz otvoreno dno transparentnoga turbinskog kućišta direktno u spremište jedinice za napajanje, koja se nalazi ispod kućišta. Voda teče kroz mlaznicu i dolazi na rotor tangencijalno, Slika 3b). Mlaznica može biti postavljena vertikalno s pomoću vijka za podešavanje (4). To omogućava kontroliranje mlaznice te osigurava protok vode. Ono ima utjecaja na proizvodnju snage koju daje turbina.
- okretno strujne jedinice koja se koristi fiksnim magnetima da inducira struju u rotirajućim pločama (10), Slika 3c). Te struje proizvode dodatno magnetsko polje, koje djeluje zajedno s vanjskim magnetskim poljem, generirajući moment kočenja. Indukcijska struja zagrijava indukcijsku ploču. Indukcija se odvija samo onda kada se indukcijska ploča kreće u

odnosu prema magnetima. Učinak kočenja određen je snagom vanjskoga magnetskog polja. Vijak za podešavanje koristi se za promjenu vanjskoga magnetskog polja promjenom udaljenosti magneta od indukcijske ploče. Sila kočenja mjeri se s pomoću senzora za mjerenje sile (7). Optički senzor (11) mjeri brzinu na reflektirajućoj podlozi na stražnjoj strani indukcijske ploče (10), Slika 3c). Signali se iz senzora za mjerenje sile i optičkog senzora prenose priključnim kablovima.

2.1. Temeljna fizikalna načela

Temeljna načela rada Peltonove turbine zasnivaju se na dobro poznatim principima zakona očuvanja, a to su jednadžba kontinuiteta (maseni protok dm/dt , koji teče kroz sustav, ostaje konstantan), zakon održanja količine gibanja (količina gibanja I jednaka je umnošku mase m i brzine c) te zakon održanja kinetičke energije (Bernoullijeva jednadžba). Bernoullijeva jednadžba omogućava cjelovito razumijevanje strojeva za proizvodnju energije putem vodnih količina jer povezuje energije prisutne u protoku. Kod Peltonove turbine razlikujemo:

1. hidrauličku energiju:

$$E_{hyd} = p * V, \quad (1)$$

pri čemu su p statički tlak, [Pa] i V volumen fluida, [m³].

2. potencijalnu energiju:

$$E_{pot} = m * g * h,, \quad (2)$$

pri čemu je g gravitacijsko ubrzanje, [m/s²], h visina stupca kapljevine (fluida), [m] i m masa fluida, [kg].

3. kinetičku energiju:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m * c^2, \quad (3)$$

za brzinu toka c , [m/s]. Sve su te zakonitosti detaljno opisane u radovima [5,8], pa se ovdje neće dodatno iznositi. Rad W u fizikalnom se smislu izvodi kada sila F djeluje po određenom putu s ($W = F * s$). U turbini stacionarno vođeno okretno kolo osigurava dotok vode na lopatice rotora. Sila djeluje na lopatice rotora u smjeru kretanja, a rad se obavlja dok se rotor okreće. Ako se preneseni rad W kod Peltonove turbine podijeli s masom tekućine m , dobiva se specifični rad:

$$Y = \frac{W}{m}. \quad (4)$$

Specifični se rad može primijeniti za definiranje pojedinog oblika brzinske visine $h = \frac{Y}{g}$, pri čemu je h kinetički oblik visine fluida, [m]. Nadalje, snaga P definirana je kao rad W (ili energija E) u jedinici vremena t :

$$P = W/t = E/t, \quad (5)$$

ili sila na putu kroz određeni vremenski inkrement. Ključni je izračun snage vezane za Peltonovu turbinu električna energija P_{el} :

$$P_{el} = U * I, \quad (6)$$

pri čemu je U napon, [V], a I struja, [A] te mehanička energija:

$$P_{mech} = M * \omega = M * 2 * \pi * n, \quad (7)$$

gdje su M moment, [Nm], a ω kutna brzina, [s⁻¹]. Hidraulička snaga tekućine definira se kao umnožak statičkog tlaka p , [Pa] i količine protoka $dV/dt = Q$, [m³/s]:

$$P_{hyd} = p * \frac{dV}{dt}. \quad (8)$$

Kinetička snaga tekućine proizlazi iz formulacije:

$$P_{kin} = \frac{1}{2} * \frac{dm}{dt} * c^2, \quad (9)$$

u kojoj dm/dt predstavlja maseni protok, [kg/s]. Učinkovitost ili iskoristivost energije u procesu proizvodnje energije ($\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\%$) definirana je odnosom odlazne (izlazne) snage P_{out} , [W] i dolazne (ulazne) snage P_{in} , [W].

3. Temeljna načela rada fizikalnog modela HM 289

U radu s Peltonovom turbinom potencijalna energija tlaka pretvara se u kinetičku energiju brzine. Ako se zanemare male geodetske razlike visina (razlike potencijalne energije položaja) i kinetička energija brzine u pravcu, može se brzina toka c prikazati kao:

$$c = \sqrt{\frac{2 * p}{\rho}}, \quad (10)$$

pri čemu su p tlak, [Pa] i ρ gustoća fluida, [kg/m³]. Brzine u trokutnom vektorskom prikazu (Slika 4) prikazuju procese (rada) u rotoru, a mogu se okarakterizirati kao:

- apsolutna brzina „ c “ - brzina koju ima mlaz vode na izlazu iz turbine u odnosu prema okolišu

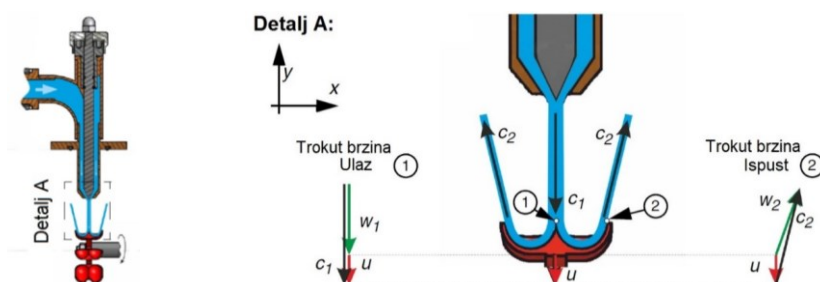
- obodna brzina „ u “ - brzina vrtnje od srednje vrijednosti promjera lopatica, koja se izračunava korištenjem brzine okretanja:

$$u = d * \pi * n, \quad (11)$$

pri čemu je d promjer rotora (0,07 m), a n rotacijska brzina, [s⁻¹]

- relativna brzina „ w “, koja odgovara brzini relativnog toka na rotirajućem rotoru.

Detalj A (Slika 4) prikazuje presjek po osi igle mlaznice. Brzine se mogu prikazati kao duljine stranica trokuta koje su poznate i kao „trokutne brzine“ u praksi. Smjer i brzina mlaza vode u rotoru mijenjaju se vremenski.



Slika 4. Detalj skretanja toka - otklon mlaza vode na mlaznicama rotora s trokutima brzina (modificirano prema [5])

Apsolutna brzina dana je uzvodnim tlakom i položajem mlaznice. Kutna (obodna) brzina rotora ovisi o momentu kočenja. Razlika daje relativnu brzinu. Na toj brzini voda teče preko konture lopatice. Trokut brzina može se opisati matematički ovim odnosom:

$$\vec{c} = \vec{w} + \vec{u}, \quad (12)$$

unutar kojega su \vec{c} vektor apsolutne brzine, \vec{u} vektor kutne brzine te \vec{w} vektor relativne brzine. Izraz (12) uključuje komponente brzine u x i y smjeru:

$$c_x = w_x + u_x \quad c_y = w_y + u_y \quad (13)$$

Usporedba brzina u trokutnom vektorskom prikazu na ulazu i izlazu mlaza vode prikazuje skretanje kojim maseni protok vode prolazi [5]. Kod prikaza trokutnih brzina na ulazu, struktura trokuta temelji se na konstantnoj apsolutnoj brzini mlaza vode. Obodna se brzina povećava s lijeva na desno. Prema tome, relativna se brzina, pri kojoj mlaz vode udara lopatice, smanjuje. Kod prikaza trokutnih brzina na izlazu, relativna je brzina vode održiva. Postoji samo jedan otklon mlaza vode. Otklon masenog protoka rezultira silom, dok su aksijalne (osovinske) komponente

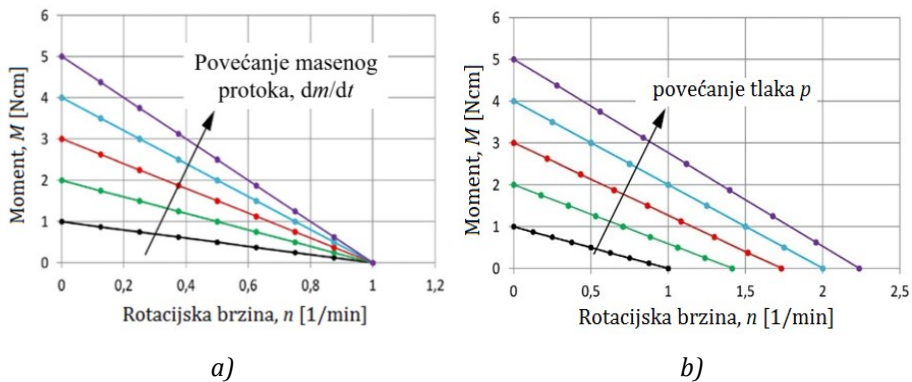
apsorbirane po ležajevima. Komponente u radijalnom (obodnom) smjeru stvaraju okretni moment zbog radijusa rotora (radnog ili okretnog kola). Energija pretvorena u rotoru ovisi o otklonu masenog protoka u obodnom (periferinom) smjeru [5,8]. Okretni moment M , koji se stvara na rotoru turbine, računa se iz sile F , koja djeluje na određenoj udaljenosti r (krak sile) od oslonca:

$$M = M * \frac{d}{2} = F * r. \quad (14)$$

Otklon je mlaza vode u tom slučaju različit od vertikalne apsolutne brzine, te vrijedi:

$$M = \frac{dm}{dt} + \Delta c_y * r = \frac{dm}{dt} + (c_{2y} - c_{1y}) * r, \quad (15)$$

pri čemu je Δc_y promjena vertikalne brzine mlaza vode, [m/s]. Peltonova turbina konstruirana je tako da se os osovine i slobodni mlaz vode nalaze okomito jedan prema drugome. Mehanička snaga može se izračunati iz profila momenta preko brzine vrtnje. Ako rotor miruje, uvijek se javlja jednak otklon mlaza vode. U tom je slučaju maseni protok dm/dt proporcionalan površini poprečnog presjeka A ($dm/dt \sim A$). Stalni tlak znači da izlazna brzina ostaje konstantna, dok se maseni protok mijenja razmjerno s poprečnim presjekom mlaznice. Ostale proporcionalnosti koje se pritom pojavljuju jesu: $F \sim dm/dt$ i $M \sim F$, pa slijedi u konačnici $M \sim dm/dt \sim A$. Kada rotor miruje, rotacijski moment povećava se u odnosu prema masenom protoku (Slika 5a).



Slika 5. a) varijacija momenta s povećanjem masenog protoka za 2, 3 4 i 5 puta, b) varijacija momenta i brzine vrtnje s porastom tlaka za 2,3 4 i 5 puta [5]

Ako rotor miruje, uvijek se javlja jednak otklon mlaza vode. U tom slučaju može se primijeniti proporcionalnost masenog protoka i brzine toka ($dm/dt \sim c$). Dodatnim razmatranjem slijedi proporcionalnost masenog

protoka i statičkog tlaka p ($dm/dt \sim c \sim \sqrt{p}$), odnosno $F \sim dm/dt * c$. Temeljem posljednje konotacije slijedi da će sila F i okretni moment M biti proporcionalni sa statičkim tlaku p ($M \sim F \sim p$). Ako se pretpostavi da je apsolutna brzina u obodnom (perifernom) smjeru c , jednaka brzini u , tada vrijedi proporcionalnost između obodne brzine u , rotacijske brzine n , brzine toka c te drugog korijena tlaka p ($u \sim n \sim c \sim \sqrt{p}$). Na Slici 5b) prikazana je promjena okretnog momenta u odnosu prema pritisku.

4. Eksperimentalna istraživanja na fizikalnom modelu

U nastavku rada prikazani su neki od značajnijih eksperimentalnih istraživanja i dobiveni rezultati nastali kao njihov produkt. Istraživanja na fizikalnom modelu HM 289 provedena su u Praktikum Laboratorija za hidrotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Izmjerene vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina podložne su stalnim promjenama (konstantno variraju oko vrijednosti radne točke), pa su se za potrebe ovog rada filtrirali izlazni podatci radi izbora zadovoljavajućih mjerodavnih vrijednosti prije same analize. Izmjerene vrijednosti pri eksperimentalnim istraživanjima dobivene HUNT-ovim programom za prikupljanje podataka obrađuju se dalje u MS Excel programu ili Matlabu (MATLAB R2012a, MathWorks, 2012.).

4.1. Eksperimentalno istraživanje 1: Odnos između brzine i tlaka

Svrha ovog pokusa je provjera sposobnosti sustava Peltonove turbine da prikaže pretvorbu energije vode iz energije statičkog tlaka u kinetičku. Potpuna pretvorba potencijalne energije u kinetičku energiju prije udara mlaza vode u lopatice rotora tipična je za ovu vrstu turbine. Pretvorba energije odvija se preko mlaznice. U ovom eksperimentalnom istraživanju, turbina radi bez kočnog momenta i s maksimalno otvorenom iglom mlaznice, obodna brzina kotača turbine je pokazatelj brzine, a regulacijom pumpe varira izlazni protok. Postupak provedbe eksperimenta je sljedeći:

1. postavljanje vrijednosti na nulu u sistemskom dijagramu
2. odabir opcije „Measurement diagram“ u HUNT-ovu programu
3. omogućavanje nove serije mjerenja; provjera postavki za novu datoteku za prikupljanje mjernih podataka
4. potpuno otvaranje kočnice s pomoću vijka za podešavanje momenta kočenja (8), Slika 2, Slika 3c)
5. otvaranje ventila (4) u potpunosti da bi se omogućila maksimalna količina protoka, Slika 2, Slika 3a)
6. postavljanje rada pumpe na vrijednost 100 % (to osigurava da zrak u dijelovima toka ne utječe na mjerene vrijednosti)

7. treba pričekati da se radna točka uspostavi; nakon toga snimaju se vrijednosti; izvršava se sljedeće mjerenje
8. kapacitet crpke i snaga variraju ovisno o željenom broju mjerenih točaka (karakteristike se ostvaruju s 5 do 6 mjernih točaka)
9. ponavljanje koraka 7. i 8. koliko god je puta potrebno do trenutka kada više nema rotacijske brzine na turbini
10. pohranjivanje izmjerenih vrijednosti u datoteke.

Na temelju provedenog eksperimenta dobivene su izlazne vrijednosti (Tablica 1, Slika 6). Brzine prikazane na Slici 6a) jednake su stvarnim brzinama c_1 slobodnog mlaza vode. Prema izrazu (10) može se izračunati najveća moguća brzina c_{1max} , a obodna se brzina turbine u može izračunati iz rotacijske brzine, prema izrazu (11)). Razlika među krivuljama prikazuje da najveća moguća dopuštena brzina nije dosegnuta zbog tlaka, već zbog gubitaka tlaka u presjeku strujanja. Gubitci tlaka uglavnom su posljedica otklona i iznenadne promjene u poprečnom presjeku, a dovode do smanjenja brzine c_{1max} na c_1 . Mehanički gubitci pokazuju da se brzina c_1 ne može u potpunosti prenijeti na obodnu brzinu okretnog kola u .

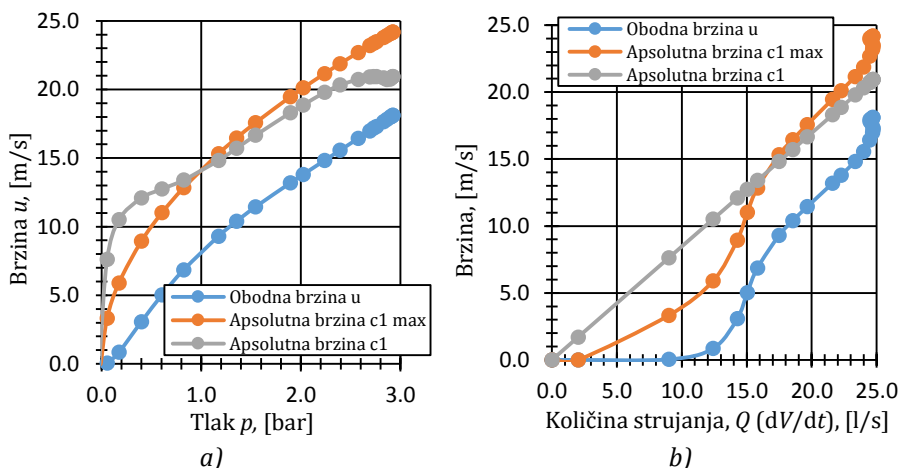
Tablica 1. a) izmjerene vrijednosti fizikalnih veličina, b) izračunate vrijednosti fizikalnih veličina za eksperimentalno istraživanje 1

Fizikalna veličina	Tlak	Rotacijska brzina	Količina protoka	Fizikalna veličina	Obodna brzina	Brzina od tlaka	Brzina od protoka	Odnos
Simbol	p	n	$dV/dt = Q$	Simbol	u	c_{1max}	c_1	$c_1/p^{0.5}$
Jedinica	bar	1/min	L/min	Jedinica	m/s	m/s	m/s	
Izmjerene vrijednosti	0,01	0	0,0	Izračunate vrijednosti	0,00	0,00	0,00	0,000
	0,02	0	2,0		0,00	0,00	1,70	0,000
	0,06	11	9,0		0,04	3,33	7,62	0,102
	0,17	231	12,4		0,85	5,89	10,51	0,080
	0,40	838	14,3		3,07	8,94	12,09	0,060
	0,61	1372	15,0		5,03	11,01	12,74	0,052
	0,82	1870	15,8		6,85	12,83	13,40	0,047
	1,17	2538	17,5		9,30	15,31	14,82	0,043
	1,35	2835	18,5		10,38	16,45	15,70	0,043
	1,54	3122	19,7		11,44	17,57	16,65	0,042
	1,89	3600	21,6		13,19	19,46	18,30	0,042
	2,02	3766	22,3		13,80	20,11	18,86	0,042
	2,24	4048	23,3		14,83	21,16	19,78	0,042
	2,39	4249	24,0		15,57	21,88	20,32	0,042
	2,57	4483	24,5		16,42	22,69	20,73	0,041
	2,69	4633	24,7		16,97	23,19	20,91	0,040
	2,73	4686	24,7		17,17	23,36	20,94	0,040
	2,76	4724	24,7		17,30	23,49	20,94	0,040
	2,83	4817	24,6		17,65	23,79	20,85	0,039
	2,86	4861	24,5		17,81	23,92	20,73	0,039
2,89	4902	24,5	17,96	24,06	20,75	0,039		
2,91	4920	24,6	18,02	24,11	20,84	0,039		
2,91	4930	24,7	18,06	24,14	20,91	0,039		
2,92	4943	24,7	18,11	24,18	20,94	0,039		
2,92	4944	24,7	18,11	24,18	20,93	0,039		

a)

b)

Na Slici 6b) prikazan je odnos brzina i količine strujanja dobivenih u prvom eksperimentu, pri čemu valja napomenuti da je promjena brzine proporcionalna količini strujanja. Primijenjeni tlak mjeren je uzvodno od turbine, na mjerneoj točki tlaka radne jedinice HM 290. Voda se pumpa kroz mlaznicu, gdje se povećava brzina zbog suženja presjeka mlaznice. Kako je potencijalna energija tlaka promijenjena u brzinsku kinetičku energiju, brzina maksimalnog protoka koja se može dobiti ovisi o uzvodnom tlaku turbine. Obodna brzina ne doseže maksimalnu moguću brzinu jer se pojavljuju gubitci koji su definirani kao gubitci tlaka (promjene u unutarnjim dimenzijama zbog protoka koji je usmjeren u drugom pravcu, kao što je koljeno cijevi, mehaničkih gubitaka u turbini te visinske razlike između senzora tlaka i izlaska vode na mlaznici).



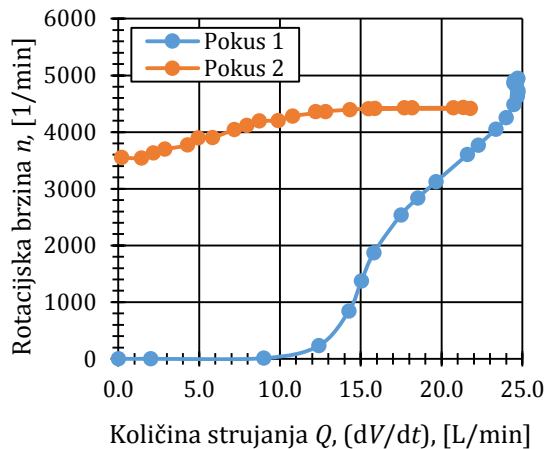
Slika 6. a) usporedba brzina na Peltonovoj turbini u odnosu prema tlaku p ,
b) usporedba brzina na turbini u odnosu prema količini strujanja Q

4.2. Eksperimentalno istraživanje 2 - Varijacija količine strujanja

Izlazna snaga turbine može se mijenjati zbog prigušenja (povećanja ili smanjenja) količine strujanja, odnosno protoka. Protok se mijenja za vrijeme trajanja pokusa s pomoću igle mlaznice koja se može otvarati ili zatvarati. Svrha je eksperimentalnog istraživanja objašnjenje kako površina poprečnog presjeka mlaznice djeluje na protok vode.

Pomicanjem igle mijenja se površina poprečnog presjeka mlaznice, te se analogno tome mijenja i količina mlaza vode na izlazu iz mlaznice. Kao rezultat toga, također se ostvaruje i promjena protoka. Konstantni tlak znači da izlaznu brzinu prije mlaznice u skladu s formulom $c = Q/A$ zadržavamo konstantnom. Količina protoka mlaza mijenja se tada proporcionalno

izlaznoj površini. Obodnu brzinu Peltonova kotača (okretnog kola) možemo uzeti kao izlaznu brzinu slobodnog mlaza. Temeljem te činjenice može se prikazati ovisnost rotacijske brzine i količine strujanja, Slika 7. Kod pokusa 1 povećava se tlak p (od 2,4 do 2,7 bara), a površina poprečnog presjeka mlaznice ostaje konstantna, dok se kod pokusa 2 površina poprečnog presjeka povećava, a tlak p držimo konstantnim (oko 2,5 bara). Iz tog se eksperimentalnog istraživanja može primijetiti da pri visokim brzinama (protoku) ne postoji velik učinak na rotacijsku brzinu (Slika 7).



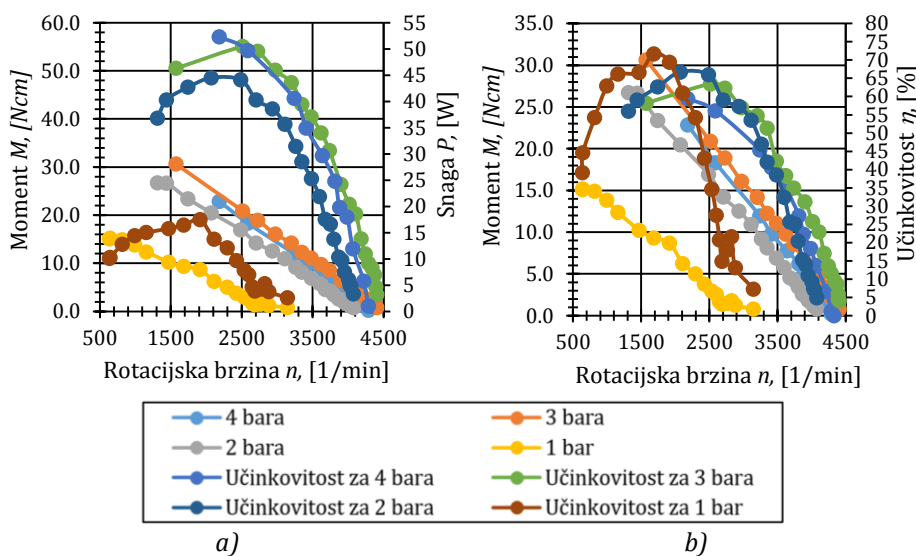
Slika 7. Prikaz rotacijske brzine u odnosu prema količini strujanja. Usporedba s tlakom (pokus 1) i poprečnim presjekom mlaznice (pokus 2)

U usporedbi s pokusom 1 ovdje se ostvaruje puno veća brzina okretnog kola. Kao zaključak provedenog istraživanja može se primijetiti da se gubitci na Peltonovoj turbini brzo povećavaju pri malim protocima. Takvi su gubitci značajni za sustav kod malih izlaznih snaga. Gubitke koji pogoduju takvom ponašanju povezujemo sa slobodnim mlazom vode, koji odstupa od idealnog mlaza kod malih protoka (negativan učinak na tok koji dolazi na lopatice Peltonova kotača), gubitcima tlaka uzrokovanih povećanjem viskoznosti tekućine s manjim otvorom mlaznice te mehaničkim gubitcima na ležaju.

4.3. Eksperimentalno istraživanje 3 - krivulje okretnog momenta

Svrha je ovoga eksperimentalnog istraživanja mjerenje operativnog ponašanja Peltonove turbine pod promjenom opterećenja i objašnjenje koeficijenta učinkovitosti. Sile, moment i učinkovitost u usporedbi s izvedenim osnovama pri konstantnom tlaku objašnjeni su u točki 2.1. ovog rada. Detaljan opis procesa rada za ovo eksperimentalno istraživanje dan je

u radu [6]. Unutar ovoga eksperimentalnog istraživanja provedeno je ukupno 7 serija mjerenja, u kojima je radni tlak varirao u vrijednosti od $p=1$ bar, $p=2$ bara, $p=3$ bara i $p=4$ bara [6]. Također su promatrane izlazne vrijednosti okretnog momenta i rotacijskih brzina za različite protoke od $Q=22$ l/s, $Q=20$ l/s, $Q=15$ l/s i $Q=10$ l/s [6]. Na temelju tih vrijednosti izračunate su prema točki 2.1. ovog rada mjerodavna mehanička snaga P_{mech} , hidraulička snaga P_{hyd} te učinkovitost rada Peltonove turbine η . U literaturi [6] dani su svi tablični prikazi izračuna gore navedenih fizikalnih veličina. Karakteristične krivulje prikazane su na Slici 8.



Slika 8. a) krivulja momenta i snage s potpuno otvorenom mlaznicom, b) krivulja momenta i učinkovitosti s potpuno otvorenom mlaznicom

Varijacije u mlaznici pojavljuju se jedino kod vrijednosti tlaka od 4 bara. Za sve je ostale krivulje mlaznica u potpunosti otvorena. Hidraulička je ulazna snaga P_{hyd} konstantna u svakoj seriji mjerenja, dok su tlak i protok regulirani preko jedinice za napajanje i igle mlaznice. Moment i rotacijska brzina Peltonova kotača nemaju utjecaja na to. Sa Slike 8 vidi se jasno da se maksimalna vrijednost snage nalazi u području od polovice vrijednosti maksimalne brzine. Vrlo slično događa se i kod učinkovitosti rada Peltonove turbine. U smislu učinkovitosti mogu se postići vrijednosti do oko 73%. Smanjenje učinkovitosti rada Peltonove turbine vezano je za gubitke, a oni su predstavljeni kao mehanički gubici, kao što su trenje u zraku i ležajevima, gubici pomaka koje uzrokuje prskanje vode (neregulirani mlaz vode), gubici tlaka u dijelu toka od pumpe do igle mlaznice te ispuhivanje mlaza vode. Otklon mlaza vode može se jasno vidjeti kroz prozirno kućište.

Radi bolje učinkovitosti rada na fizikalnome modelu turbine potrebno je zadovoljiti jasan mlaz vode koji se ne raspršuje.

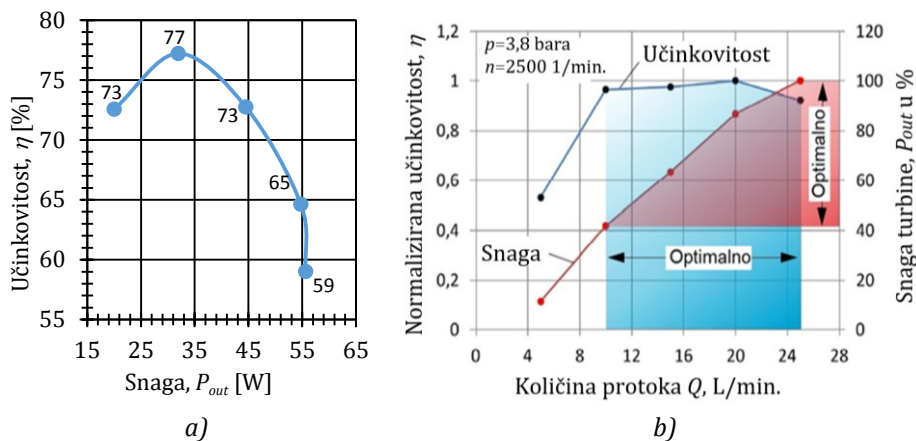
4.4. Eksperimentalno istraživanje 4

Svrha provedenog eksperimentalnog istraživanja je zabilježiti karakteristične podatke iz fizikalnog modela te iz njih dobiti krivulju odnosa mehaničke snage i učinkovitosti pri konstantnom tlaku i konstantnoj rotacijskoj brzini. Dok konstantni tlak daje visina spremnika vode, brzina se mora zadržavati konstantnom zbog mrežne frekvencije jer u konvencionalnim generatorima brzina i mrežna frekvencija moraju biti razmjerne jedna s drugom da bi se stvarna električna energija pojavljivala u mreži. Kao rezultat tih varijabli nastaje optimalna radna točka u sustavu. Opis procesa rada i mjerenja fizikalnih veličina na fizikalnome modelu opisani su u [6]. U nastavku su prikazane ulazne i izlazne vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina za provođenje ovoga eksperimentalnog istraživanja, Tablica 2. Treba napomenuti da se tlak u eksperimentu držao na vrijednosti od približno 2,5 bara, dok je rotacijska brzina uspostavljena s približno 2200 min⁻¹.

Tablica 2. Izmjerene vrijednosti u eksperimentalnom istraživanju 4

Fizikalna veličina	Moment	Tlak	Rotacijska brzina	Količina protoka	Mehanička snaga	Hidraulička snaga	Učinkovitost turbine
Simbol	M	p	n	$Q (dV/dt)$	P_{mech}	P_{hyd}	η
Jedinica	Ncm	bar	1/min	L/min	W	W	%
Izmjerene vrijednosti	24,0	2,36	2214	24,0	55,7	94,3	59
	23,8	2,39	2197	21,3	54,7	84,7	65
	19,0	2,50	2234	14,7	44,5	61,2	73
	13,8	2,59	2203	9,6	31,9	41,4	77
	8,7	2,66	2201	6,2	20,0	27,6	73

Poznavanjem tlaka i brzine može se dobiti jasna krivulja učinkovitosti (iskoristivosti) u širokom rasponu snage, Slika 9a). Učinak se smanjuje pri vrlo malim protocima. Ti su rezultati u skladu s eksperimentalnim istraživanjem 1, gdje su zabilježeni gubitci pri maloj snazi. Normalizirana učinkovitost Peltonove turbine korištena ovdje odnosi se na maksimalnu učinkovitost koju sustav postiže. Praktički koristan raspon visoke učinkovitosti opada ako je protok značajno smanjio brzinu [5], Slika 9 b).



Slika 9. a) krivulja učinkovitosti u odnosu prema mjerenoj snazi, b) normalizirana učinkovitost i mehanička snaga turbine u odnosu prema količini protoka (modificirano prema [5])

Plava krivulja na Slici 9b) prikazuje učinkovitost rada turbine u odnosu prema količini protoka Q te se jasno vidi da krivulja raste s porastom količine protoka, odnosno što se više približava maksimalnom protoku, počinje opadati. Crvena krivulja prikazuje izlaznu snagu Peltonove turbine, tj. mehaničku snagu u odnosu prema količini protoka, te se može primijetiti da porastom količine protoka njena mehanička snaga raste. Raspon obojanih polja definira granice zadovoljavajućih, odnosno optimalnih vrijednosti rada Peltonove turbine.

5. Zaključak

U ovom radu opisan je fizikalni model Peltonove turbine, njegova temeljna fizikalna načela rada i funkcija samog uređaja te rad na njemu. Eksperimentalnim ispitivanjima određene su pojedine značajne fizikalne veličine kroz četiri provedena eksperimenta na temelju kojih su izvršene njihove usporedbe u području korištenja vodnih snaga. U prvom eksperimentu analizirana je varijabilnost određenih brzina koje se mijenjaju u ovisnosti o povećanju radnog tlaka i količine strujanja (protoka), dok se u drugom eksperimentu razmatrala varijacija količine strujanja koja raste u ovisnosti o otvorenosti (pomaku) igle mlaznice od krajnjega poprečnog profila mlaznice. Zbog povećanja protoka dolazi do prirasta rotacijske brzine na lopaticama turbine, što u konačnici rezultira povećanjem inducirane električne energije. Na temelju varijabilnosti radnog tlaka i količine strujanja u trećem su eksperimentu analizirane promjene okretnog momenta u ovisnosti o rotacijskoj brzini te je određena

maksimalna učinkovitost rada turbine. U posljednjem je eksperimentu fokus bio na dobivanju maksimalne učinkovitosti turbine promjenom izlazne snage turbine dobivene varijabilnom količinom protoka. Iz provedene se analize vidi da učinkovitost turbine raste do određene vrijednosti snage turbine (efikasna radna točka), nakon koje počinje lagano opadati.

Budući da je fizikalni model GUNT HM 289 sastavljen od dijelova (demontažni fizikalni model), može se skinuti okretno kolo i zamijeniti ga drugim kolom različita oblika i performansi (različito oblikovanje lopatica). Na taj način moglo bi se u cijelosti provesti jednaka eksperimentalna istraživanja na novoj turbini, te novodobivene podatke usporediti s podacima dobivenim u ovom radu. Bila bi to zanimljiva usporedba jer bi se na taj način uvidio razlog zašto se kod Peltonove turbine koristio baš takav specifičan oblik lopatica na okretnom kolu.

Zahvala. *Ovaj je članak rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001), koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.*

Literatura

- [1] Agroskin, I.I. *Hidraulika*. Tehnička knjiga Zagreb. Zagreb.
- [2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Peltonova_turbina . Preuzeto dana 22. 6. 2016.
- [3] Jović, V. 2006. *Osnove hidromehanike*. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije. Sveučilište u Splitu. Element. Split.
- [4] Lončar, A. 2012. *Mehanika tekućina. Interna skripta iz kolegija Mehanika fluida*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb.
- [5] Schaller, M. 1. 1. 2013. *Experiments with a Pelton turbine*. GUNT Hamburg. Hamburg.
- [6] Završni rad iz kolegija Hidromehanika: Komljenović, S. 2016. *Fizikalni model Peltonove turbine – eksperimentalna istraživanja*. Građevinski fakultet u Rijeci. Rijeka.
- [7] Žic, E.; Ožanić, N.; Karleuša, B. 2010. *Skripta zadataka iz kolegija Hidromehanika*. Građevinski fakultet u Rijeci. Rijeka.
- [8] 2013. *HM 290 turbine demonstrator supply module*. GUNT Hamburg. Hamburg. Germany.