

MOGUĆNOSTI POBOLJŠANJA DIZAJNA LOPATICA PELTON TURBINE

Grlaš, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:869480>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**MOGUĆNOSTI POBOLJŠANJA DIZAJNA LOPATICA
PELTON TURBINE**

Rijeka, srpanj 2024.

David Grlaš

0069092053

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

MOGUĆNOSTI POBOLJŠANJA DIZAJNA LOPATICA

PELTON TURBINE

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija, dipl. ing.

Komentor: v. asist. dr. sc. Ivana Lučin

Rijeka, srpanj 2024.

David Grlaš

0069092053

Rijeka, 20.03.2024.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo
Predmet: Hidraulički strojevi

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **David Grlaš (0069092053)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)

Zadatak: **Mogućnosti poboljšanja dizajna lopatica Pelton turbine / Possibilities of geometry design improvement of the Pelton turbine bucket**

Opis zadatka:

U radu je potrebno napraviti pregled literature o Pelton turbini, uključujući povijesni razvoj, opis djelova Pelton turbine i konstrukciju rotora Pelton turbine i konstrukciju lopatice Pelton turbine. Potrebno je napraviti pregled novih metoda razvoja konstrukcije lopatice kao i tehnika koje se koriste za poboljšanje. Upotrebom dostupnih CAD alata potrebno je definirati 3D geometriju rotora Pelton turbine. Potrebno je pripremiti nekoliko izvedba s različitim geometrijama lopatice turbine.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Zoran Čarija

Komentor:
dr. sc. Ivana Lučin

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Također bih se želio zahvaliti na pruženoj pomoći i potpori prof.dr.sc. Zoranu Čariji te v. asist. dr. sc. Ivani Lučin.

David Grlaš

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	ENERGIJA VODE.....	3
3.	PELTONOVA TURBINA	6
3.1.	Lester Allan Pelton I povijesni razvoj	6
3.2.	Tehničke karakteristike	8
3.3.	Konstrukcija	8
4.	KONSTRUKCIJA LOPATICA I TEHNIKE UNAPRJEĐENJA	12
4.1.	Oblik lopatica	12
4.2.	Broj lopatica.....	13
4.3.	Ulazni kut.....	14
4.4.	Izlazni kut.....	15
4.5.	Trenje u lopaticama	16
4.6.	Utjecaj erozije	17
5.	IZRADA GEOMETRIJE PELTONOVE TURBINE.....	19
5.1.	Autodesk Inventor Professional 2023	20
5.2.	Izrada lopatice	21
5.3.	Izrada rotora	30
5.4.	Završni izgled Peltonove turbine u Autodesk Inventor	37
6.	ZAKLJUČAK.....	38
7.	LITERATURA	39
	POPIS SLIKA	40
	SAŽETAK	42
	SUMMARY	43

1. UVOD

Voda je neophodan element za život na Zemlji, igrajući ključnu ulogu u svim aspektima ljudskog, biljnog i životinjskog postojanja. Od samih početaka čovječanstva ljudi su pokušavali iskoristi vodu za što više različitih namjena. Prvotno se voda koristila isključivo za napajanje, a tijekom stoljeća se počela iskorištavati njena energija. Prvi mehanizmi za iskorištavanje energije vode su bila vodena kola. Koeficijent iskoristivosti takvih strojeva je vrlo nizak pa se oni danas koriste samo u turističke svrhe kao prikaz čovjekove baštine. Poboljšavajući vodena kola čovječanstvo je izmislilo turbine.

Turbine su energetske strojevi koji omogućavaju kontinuirani protok radnog fluida kroz sustav statorskih i rotorskih lopatica. Turbine pretvaraju potencijalnu ili toplinsku energiju fluida u kinetičku energiju, koja se potom vrtnjom rotora pretvara u mehanički rad. Ova mehanička energija koristi se za pokretanje električnih generatora, pumpi, kompresora i drugih uređaja.

Postoje mnoge različite vrste vodnih turbina, međutim najrasprostranjenije su Peltonova, Kaplanova i Francisova. Kaplanova turbina je aksijalna turbina te je imenovana po svom tvorcu profesoru Viktoru Kaplanu. Ona predstavlja najraniji dizajn turbine koja sadrži propeler sa fiksnim rotorskim lopaticama. Zbog svoje se konstrukcije primjenjuje kod malih padova i velikih protoka. Radi takvih karakteristike ovakve turbine se uglavnom primjenjuju u ravninskim područjima, na rijekama koje osiguravaju cjelogodišnji visoki protok. Francisova turbina je konstrukcijska turbina nazvana po inženjeru Jamesu B. Francisu. Ova turbina sadrži spiralu koja mora osigurati pravilnu distribuciju vode na svojem izlazu. Voda iz spirale ide u lopatice koje omogućuju pravilan ulazak vode u rotor te se u rotoru događa pretvorba iz kinetičke energije u mehanički rad. Francisova turbina ima široku primjenu na rijekama sa srednjim padom i srednjim protocima. Peltonova turbina, imenovana po svom tvorcu Lesteru Allanu Peltonu, predstavlja jednu od ključnih hidrauličkih turbina u pretvaranju hidrauličke energije vode u mehaničku rotacijsku energiju. Njezina iznimna učinkovitost, pouzdanost i fleksibilnost čine je preferiranim izborom u hidroelektranama diljem svijeta. Peltonova turbina, zbog svoje konstrukcije, je najpogodnija za velike brzine strujanja fluida i male protoke. [7]

Ovaj rad pruža pregled literature o Peltonovoj turbini, usredotočujući se na njezin povijesni razvoj, opis dijelova te konstrukciju rotora i lopatica turbine. Također opisuje novije metode u razvoju konstrukcije lopatice te tehnike koje se primjenjuju radi poboljšanja performansi. Primjenom suvremenih CAD alata definira 3D geometriju rotora Peltonove turbine.

Kroz varijacije u geometriji lopatica, ovaj rad istražuje različite pristupe dizajna Peltonovih turbina s ciljem poboljšanja učinkovitosti.

U drugom poglavlju opisana je energija vode i njena povijesna i tehnička važnost za razvoj industrije. Poseban naglasak stavljen je na to koliko je voda ključna za dobivanje električne energije u modernom svijetu gdje hidroelektrane predstavljaju značajan izvor obnovljive energije. Treće poglavlje daje pregled života izumitelja Lestera Allana Peltona, fokusirajući se na njegov rad i kako je razvio turbinu koja nosi njegovo ime, poznatu kao Peltonova turbina. U ovom poglavlju također su detaljno opisane tehničke karakteristike Peltonove turbine te su navedeni svi dijelovi koji čine njenu konstrukciju. U četvrtom poglavlju objašnjen je način izrade Peltonove turbine, uključujući detaljan opis cijelog procesa izrade geometrije. Ovo poglavlje također sadrži osnovne informacije o softveru koji se koristi za izradu geometrije, pružajući uvid u alate koji omogućuju preciznu konstrukciju i optimizaciju turbine. Peto poglavlje sadrži informacije o načinima unaprjeđenja Peltonove turbine, ističući najvažnije čimbenike koji se mogu poboljšati kako bi se povećala učinkovitost turbine. Detaljno su analizirane različite metode i pristupi koji mogu doprinijeti boljim performansama i dugovječnosti ovog ključnog mehanizma u hidroenergetici.

2. ENERGIJA VODE

Energetski potencijal vode predstavlja jedan od najznačajnijih izvora obnovljive energije, pružajući ekonomsku konkurentnost u odnosu na fosilna goriva i nuklearnu energiju. Ova energija, sadržana u tekućinama koje se kreću određenom brzinom, obuhvaća potencijalnu, kinetičku i pritisnu energiju, od kojih se svaka može transformirati u korisni oblik pomoću mehanizama za konverziju energije.

Korištenje energetskog potencijala vode datira još iz antičkih vremena. Grci i Rimljani su prije nove ere koristili vodena kola pokretana tokovima rijeka i potoka za pogon mlinova za mljevenje žita i kukuruza (slika 2.1.). Ova se tehnologija proširila do Kine tijekom 1. stoljeća, gdje je nastavila evoluirati. Od 13. stoljeća primjena vodenih kola proširila se cijelim starim kontinentom, rezultirajući razvojem vodenih turbina koje su u potpunosti zamijenile vodena kola u vrijeme 1. industrijske revolucije. [11]



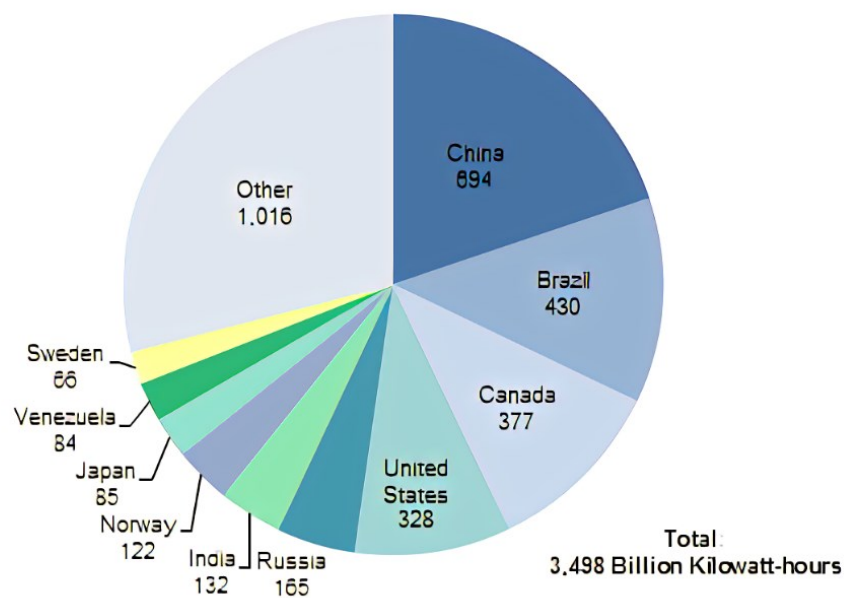
Slika 2.1. Vodeno kolo [10]

Trenutno se razvijaju ili su u upotrebi različiti oblici energije. Iako su neki oblici isključivo mehanički, većina se fokusira na pretvorbu energije vode u električnu energiju. Energija dobivena iz vodenih tokova, danas predstavlja izvor od 715 000 MW ili 19% ukupne svjetske proizvodnje električne energije.

U suvremenom kontekstu, kada se napušta korištenje nuklearne energije, a solarna energija i energija vjetra suočavaju se s izazovima vezanim uz akumulaciju i skladištenje energije, iskorištavanje vodene energije postaje posebno atraktivno. Hidroenergija se smatra najrealnijim vrstom istinske zelene energije te se njena količina na energetsom tržištu konstantno nastoji povećati.

U proteklih nekoliko stotina godina, traje nadmetanje između država koje nastoje proizvesti što više hidroenergije te se time istaknuti na svjetskom tržištu. Po podacima za 2011. godinu, magazin Hydro-Power Energy je objavio da zemlje koje prednjače u proizvodnji hidroelektrične energije uključuju Kinu, Brazil, Sjedinjene Američke Države, Kanadu i Rusiju. Od njih je Kina najveći proizvođač hidroenergije te ima i najveću hidroelektranu na svijetu na rijeci Yangtze (slika 2.3.). Drugo mjesto na globalnoj razini zauzima Brazil koji zahvaljujući vremenskim padalinama i rijeci Amazoni ima jako dobre uvjete za proizvodnju hidroenergije. Slijede Sjedinjene Američke Države, Kanada i Rusija. Slika 2.2 prikazuje proizvodnju hidroelektrične energije za 2011. godinu. [9]

Hydroelectric Generation by Country 2011 (Billion Kilowatt-hours)



Earth Policy Institute - www.earth-policy.org

Source BP

Slika 2.2. Postotak proizvodnje hidroelektrične energije po državama 2011.godine [9]



Slika 2.3. Najveća hidroelektrana na svijetu [12]

3. PELTONOVA TURBINA

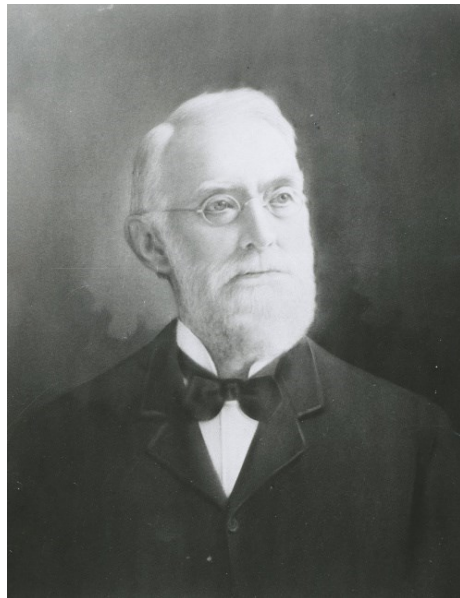
3.1. Lester Allan Pelton I povijesni razvoj

Lester Allan Pelton (slika 4.1.) je bio američki izumitelj koji je ostavio dubok trag u povijesti razvoja hidroelektrične energije svojim revolucionarnim doprinosima. Rođen 1829. godine u obitelji farmera, Pelton je svoje djetinjstvo proveo u ruralnom okruženju, stječući osnovno obrazovanje u obližnjoj školi u malom gradiću Vermilion. Suočen s ekonomskim izazovima i siromaštvom, odlučio se preseliti u Kaliforniju kako bi se pridružio zlatnoj groznici. Nije bio uspješan kao rudar zlata, stoga se bavio obradom drva.

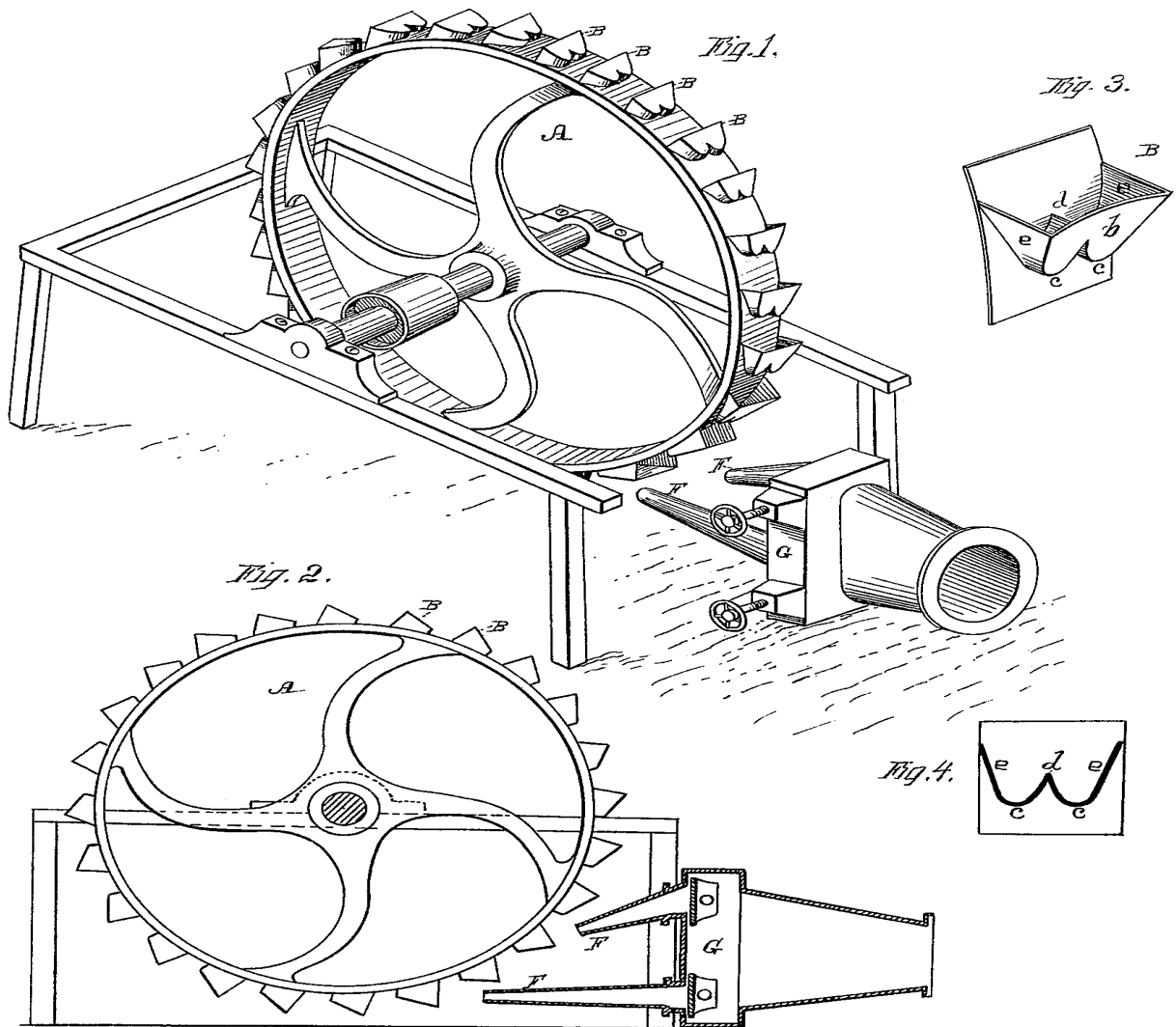
Peltonova ideja za unaprjeđenjem mlinskog kola došla je tijekom proučavanja rudarske opreme. Jednog dana, dok je promatrao rotirajuću vodenu turbinu, ključ koji je držao njezin kotač na osovinu ispao je, što je rezultiralo njezinim izobličenjem. Umjesto da mlaz udari u lopaticu u sredini, izobličenje je rezultiralo udarcem blizu ruba. Umjesto da se protok vode zaustavi, sada je bio preusmjeren u polukrug, ponovno izlazeći s promijenjenim smjerom. Iznenada, turbina se sada kretala brže. To je bio Peltonov veliki pronalazak. Za razliku od drugih turbina gdje je mlaz udarao u sredinu lopatice i prskanje udarne vode trošilo energiju, Peltonov dizajn omogućio je efikasnije korištenje kinetičke energije vode. Eksperimentirajući i modelirajući, Pelton je poboljšao učinkovitost Knightovog kotača. Dok je Knightov kotač primao mlaz strujanja malo izvan središta i pod kutom u jednu turbinu lopatice, Peltonov kotač koristio je podijeljenu dvostruku lopaticu, što je omogućilo bolje iskorištavanje energije mlaza.

Kasnih 1870-ih godina, Pelton je razvio, testirao i proizveo svoj prvi turbinski kotač, nazvan Pelton Runner. Godine 1878., na Mayflower Mine u Nevada Cityju, instalirao je prvi operativni Peltonov kotač. U to vrijeme, kotač Knight Foundryja je bio industrijski standard, no Peltonov dizajn pokazao se znatno učinkovitijim. Na međunarodnoj konferenciji održanoj 1883. godine u Idaho Mineu, Peltonov dizajn je pružao 90 posto učinkovitosti, dok je sljedeći najbolji konkurent postigao manje od 77 posto. Na slici 4.2 moguće je vidjeti prototip patenta Peltonove turbine.

Pelton je preminuo 1907. godine te je pokopan u svom rodnom gradu Vermilion. Godine 2006. je posthumno primljen u Nacionalnu izumiteljsku kuću slavnih zbog svog doprinosa znanosti i svijetu. [6]



Slika 3.1. Lester Allan Pelton [6]



Slika 3.2. Slika patenta [6]

3.2. Tehničke karakteristike

Pelton-ove turbine rade pri najvišim padovima, a radi slobodnog mlaza koji udara u lopatice rotora vrlo često se zovu turbine slobodnog mlaza. Peltonova turbina je akcijska turbina, koja iskorištava gotovo svu količinu gibanja mlaza vode na način da mlaz napušta lopaticu bez gotovo ikakve brzine. Prije Peltonove, gotovo sve vodene turbine bile su reakcijski strojevi pokretani vodenim tlakom, dok je Peltonov kotač pokretan kinetičkom energijom visokobrzinskog mlaza vode koji se mogao praktično razviti iz malog planinskog potoka. U današnje vrijeme se turbina većinski koristi za proizvodnju električne energije. [2]

Peltonova turbina se razlikuje od drugih turbina jer nije potopljena u fluidu, nego se lopatice okreću u zraku. Ova konfiguracija čini proračun i određivanje njezinih karakteristika složenijim, nego kod nekih drugih vrsta turbina. Međutim, njezina efikasnost i sposobnost iskorištavanja kinetičke energije vode čine je popularnim izborom za hidroelektrane s velikim padovima i malim protocima.

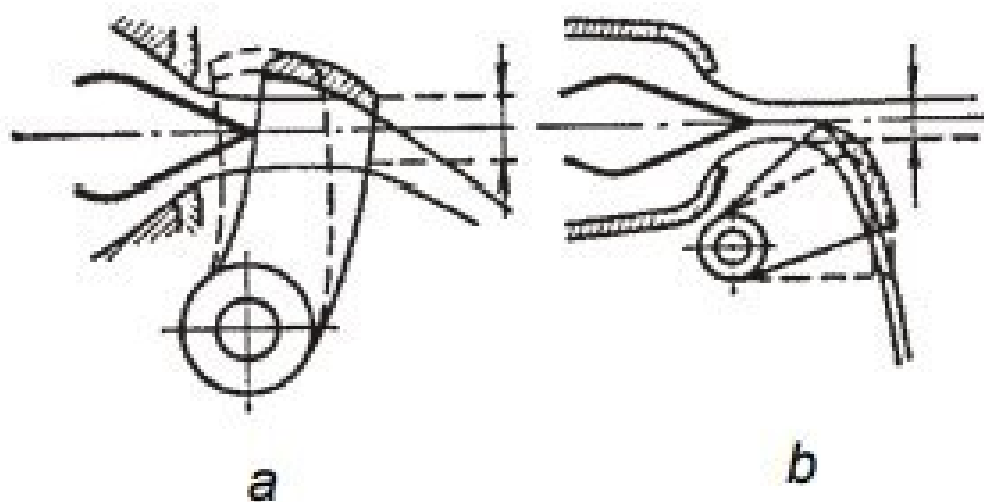
U današnje vrijeme, Peltonova turbina se koristi kod hidroelektrana koje imaju velike visinske razlike i ograničene količine vode. Njezina maksimalna snaga može doseći otprilike 400 MW, što je čini izuzetno učinkovitim izvorom obnovljive energije. [5]

3.3. Konstrukcija

Peltonove turbine su konstrukcijski najjednostavnije vrste vodenih turbina. Sastoje se od privoda vode, sapnica i rotora. Sapnicama se vrši pretvorba tlačne energije u kinetičku energiju vodnog mlaza, koja se zatim prenosi na lopatice rotora. Regulacija protoka vode se postiže pomicanjem regulacijske igle. Konstrukcija je relativno jednostavna jer se sastoji od privoda vode, mlaznice i rotora.

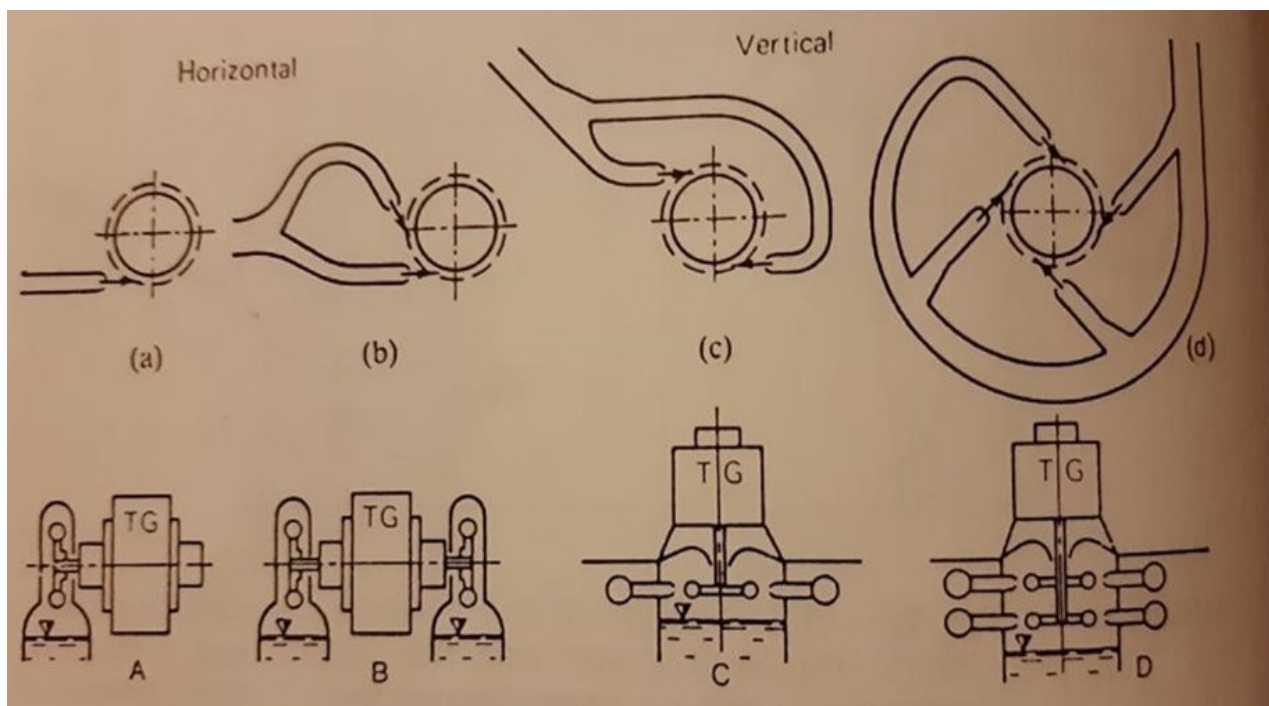
Naglo zatvaranje sapnica regulacijskom iglom može rezultirati hidrauličkim udarom u tlačnom cjevovodu, što može prouzročiti neželjene posljedice i havariju. Zbog toga se zatvaranje sapnice s regulacijskom iglom provodi polagano. Prava regulacija protoka vode postiže se pomoću regulacijskog deflektora (slika 3.3), koji pravovremeno "reže" vodeni mlaz i kontrolira dotok vode. Na slici 3.5 vidljiva je konstrukcija turbine.

Deflektor radi na principu da se u situacijama kada je potrebno iznenada smanjiti snagu turbine, aktivira naredbeni impuls. Tada se deflektor brzo pomakne, potpuno preusmjeravajući vodeni mlaz, dok divertor djelomično usmjerava vodeni mlaz kako bi osigurao potrebno smanjenje snage i zadržavanje brzine protoka. Istovremeno se primjenjuje naredbeni impuls za zatvaranje igle, ali njezin pokret je puno sporiji, što omogućuje postupno mijenjanje protoka i sprječava stvaranje hidrauličkog udara. Pomak deflektora se ostvaruje u trajanju od 2 do 3 sekunde dok cijeli proces zatvaranja igle traje od 20 do 40 sekundi. [7]



Slika 3.3. Regulacijski deflektor [7]

Tlačna energija se mlaznicama pretvara u kinetičku energiju vodenog mlaza, koja se zatim prenosi na lopatice rotora. Ukupan broj mlaznica ima značajan utjecaj na Peltonove turbine. Povećanjem broja mlaznica povećava se snaga turbine bez promjene promjera kotača. Na slici 3.4. shematski su prikazane najpopularnije konstrukcije Peltonovih turbina. Turbine se dijele na horizontalne i vertikalne prema položaju vratila rotora. Rotor može imati različit broj mlaznica pričvršćenih na njega. Kod horizontalno postavljenog vratila, rotor je izložen djelovanju jedne (a) ili dvije (b) mlaznice koje zahtijevaju posebne grane. Broj grana i mlaznica u turbinama s vertikalnim vratilom lako je promijeniti koristeći spiralni dovod vode. Dostupne su opcije s dvije (c), četiri (d), šest ili neparnim brojem mlaznica. Turbina može imati jedan ili dva rotora. Peltonove turbine s horizontalnim vratilom često imaju jedan (A) ili dva (B) rotora. Peltonove turbine s vertikalnim vratilom obično imaju jedan (C) rotor, iako je teoretski moguće dodati dva (D) rotora. Postavljanje više rotora na vertikalno vratilo zahtijeva pažljivo planiranje kako bi se spriječilo hidrodinamičko narušavanje donjeg rotora od strane gornjeg rotora. [7]



Slika 3.4. Varijacije Peltonove turbine [7]

Izvedba Peltonove turbine s vertikalnim vratilom često je povoljnija jer omogućuje dovod vode po obodu rotora i postavljanje rotora na minimalnu visinu iznad donje vode. Ovaj način dovoda vode po obodu rotora omogućuje korištenje većeg broja mlazova koji se nalaze na istoj geodetskoj koti, što je korisno s aspekta regulacije protoka vode.

Rotor Pelton-ove turbine, radi konstrukcijskih razloga, mora biti izdignut iznad donje vode za iznos koji je direktni gubitak te treba biti minimalan.

Rotor turbina se može sastojati od 12 do 40 lopatica, a svaka je lopatica oštrim bridom podijeljena u dva jednaka ovalna dijela. Ovakav oblik lopatice „reže“ mlaz vode u dva dijela od kojih svaki napušta lopaticu pod kutom od gotovo 180° . Karakteristična osobina lopatica Peltonovih turbina je njihovo privremeno opterećenje, za razliku od lopatica rotora Francisovih turbina koje su stalno pod opterećenjem. Tijekom dodira lopatice s mlazom nagib lopatice prema mlazu, kao i mjesto gdje ovaj ulazi u lopaticu, se stalno mijenja. [7]

4. KONSTRUKCIJA LOPATICA I TEHNIKE UNAPRJEĐENJA

Lopaticice Peltonove turbine izložene su složenim turbulentnim višefaznim dinamičkim tokovima te su kao takve privukle veliku pažnju znanstvenika koji se bave Računalnom dinamikom fluida (CFD) kako bi vizualizirali protoke. Osim toga, optimizacija geometrije lopatica bila je čest istraživački pravac korištenjem analitičkih i grafičkih metoda. Oba ova polja istraživanja rezultirala su značajnim poboljšanjem u performansama Peltonovog turbinskog sustava.

Veliki problem tijekom godina su bile visoke cijene softvera za Računalnu dinamiku fluida te se neki složeniji oblici lopatica nisu mogli ispitivati i koristiti. Danas je razvoj točnih i jeftinih CFD modela te inovativne proizvodne tehnologije poput brze izrade prototipova omogućio simulaciju i proizvodnju složenih slobodnih oblika. Stoga je dizajn lopatica koji je prije bio zanemaren u optimizaciji zbog izvedivosti proizvodnje sada moguće proizvesti i vrijedan je istraživanja.

U današnje vrijeme, pokušavaju se optimizirati svi faktori i specifikacije lopatica kako bi se što više povećala iskoristivost i smanjili gubici. [1]

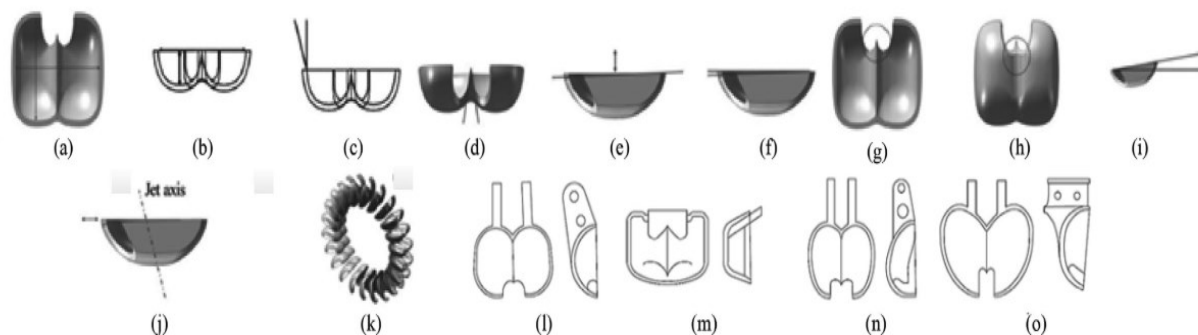
Na iskoristivost lopaticice utječu brojni čimbenici, kao što su: broj lopatica, oblik, ulazni kut lopaticice, duljina, širina, dubina, kut izlaza fluida...

4.1. Oblik lopatica

Oblik lopatica je jedna od ključnih karakteristika kod Peltonove turbine iz nekoliko razloga:

1. Efikasnosti pretvorbe energije - oblik lopatica direktno utječe na sposobnost lopaticice da učinkovito hvata i preusmjerava vodeni mlaz, što povećava efikasnost pretvorbe energije iz mlaza vode u mehanički rad
2. Minimiziranja gubitaka energije - dobro oblikovane lopaticice smanjuju turbulenciju i raspršivanje vode prilikom udara mlaza, što minimizira energetske gubitke
3. Kontrole sile i ravnoteže - oblik lopatica utječe na ravnomjerno raspoređivanje sile kada mlaz udara u njih. Optimalan oblik osigurava da sile djeluju simetrično i ravnomjerno, što smanjuje vibracije i naprezanja na mehaničke dijelove turbine te produžava vijek trajanja sustava
4. Utjecaja na performanse pri različitim protocima - pravilno oblikovane lopaticice omogućuju turbini da radi efikasno u širokom rasponu radnih uvjeta, uključujući promjene u protoku vode i pritisku

Oblici lopatica ovise o mnogim fizikalnim veličinama kao što su: duljina, širina, dubina, izlazni kut, ulazni kut... Slika 4.1. prikazuje oblike lopatica s obzirom na određene fizikalne veličine. Na slici su vidljivi: a) omjer duljine i širine, b) omjer dubine i širine, c) izlazni kut, d) ulazni kut, e) razina razdjelnika, f) kut vrha, g) geometrija vrha, h) stražnja strana razdjelnika, i) kut nagiba, j) radijalni položaj, k) broj lopatica, l) kružna lopatica, m) elipsoidna lopatica, n) pravokutna lopatica i o) lopatica u obliku srca [18]



Slika 4.1. Različiti oblici lopatica [18]

4.2. Broj lopatica

Kao i oblik lopatice, broj lopatice je jedna od ključnih karakteristika Peltonove turbine.

Neki od utjecaja broja lopatica su:

1. Optimalna iskoristivost energije - odgovarajući broj lopatica omogućuje efikasan prijenos energije iz mlaza vode na rotor turbine. Previše ili premalo lopatica može rezultirati iskorištavanjem energije i smanjenjem učinkovitosti, stoga je potrebno dobro izračunati broj lopatica
2. Ravnoteža rotora - pravilno balansiranje broja lopatica pomaže u održavanju stabilnosti rotora, dok bi neravnomjerna raspodjela lopatica mogla dovesti do vibracija i oštećenja turbine
3. Troškovi i složenost konstrukcije - različit broj lopatice uvelike doprinosi troškovima i složenosti konstrukcije turbine

Broj lopatica jako ovisi o veličini rotora i namjeni turbine. Broj lopatica kod Peltonove turbine varira između 12 i 40. Prilikom uporabe malenih turbina niskih snaga najviše se primjenjuju turbine sa 12 lopatica. U velikim hidroelektranama, gdje promjeri turbine mogu biti veliki i po nekoliko metara, primjenjuju se turbine sa 30 do 40 lopatica. Na slici 4.2. je prikazana turbina sa 20 lopatica.



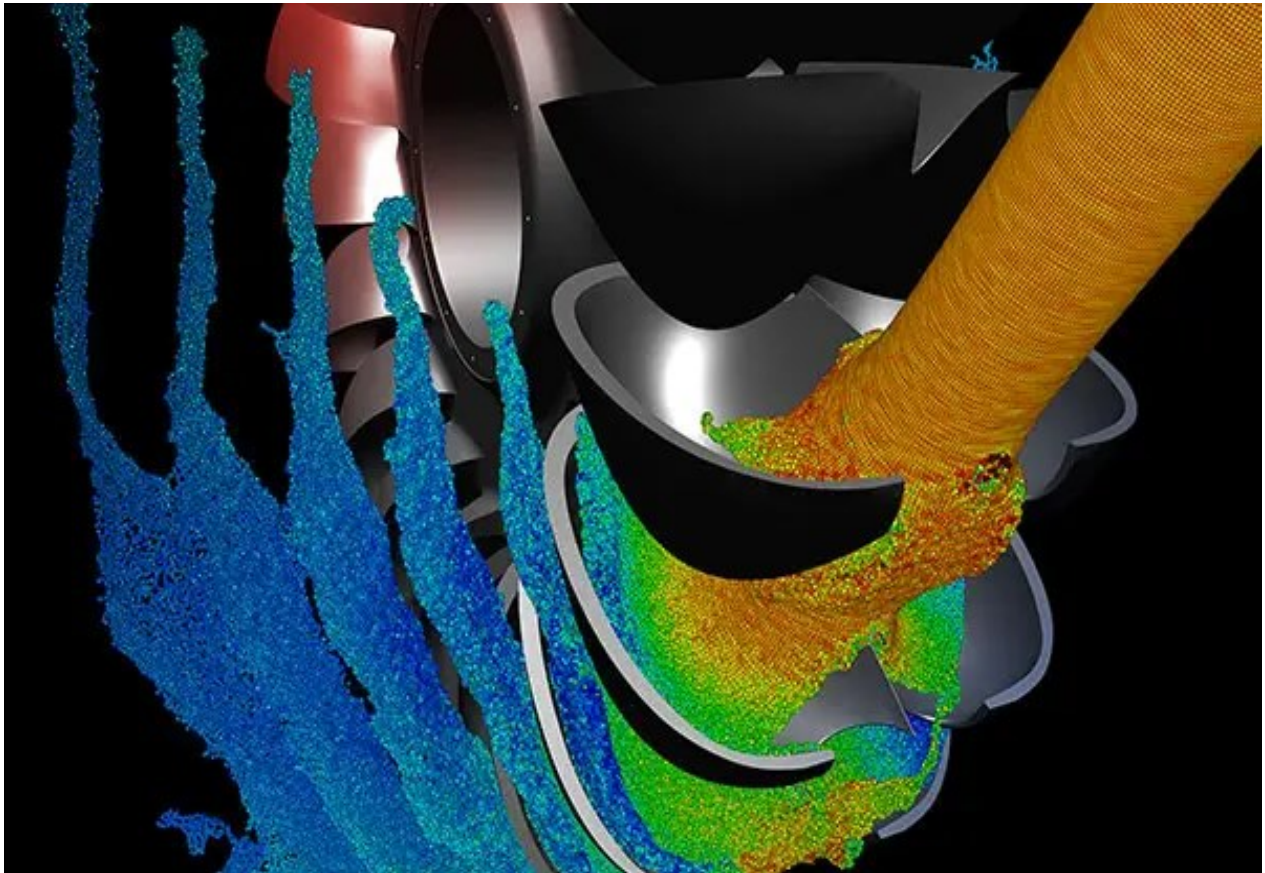
Slika 4.2. Turbina velikog promjera sa 20 lopatice [13]

4.3. Ulazni kut

Ulazni kut je najzaslužniji za pretvorbu energije fluida u kinetičku energiju turbine. Ulazni kut određuje kako i pod kojim kutom će se rezati mlaz fluida. Upravo je ulazni kut i zaslužan što je Lester A. Pelton i dizajnirao turbinu. Neki od utjecaja ulaznog kuta su:

1. Optimalno usmjeravanje mlaza - ulazni kut određuje početni smjer mlaza vode u odnosu na lopaticu. Pravilan ulazni kut osigurava da mlaz vode udari u lopaticu pod idealnim kutom, što omogućava maksimalan prijenos energije iz mlaza na rotor
2. Smanjenje udarnih gubitaka - kada je ulazni kut optimalan, fluid ulazi u kontakt s lopaticom i time smanjuje udarne gubitke
3. Sprječavanje kavitacije - kavitacija je veliki problem u radu turbine. Kvalitetna izrada ulaznog kuta pomaže u održavanju stabilnog tlaka fluida te sprječava kavitaciju.
4. Pravilnu distribuciju opterećenja - pravilan ulazni kut omogućuje ravnomjernu distribuciju fluida po cijeloj lopatici i proširuje životni vijek lopatice

Slika 4.3. prikazuje simulaciju djelovanja fluida na lopaticu Peltonove turbine. Na slici je vidljiva važnost ulaznog kuta koji reže mlaz fluida i mijenja dinamiku i opterećenje mlaza.



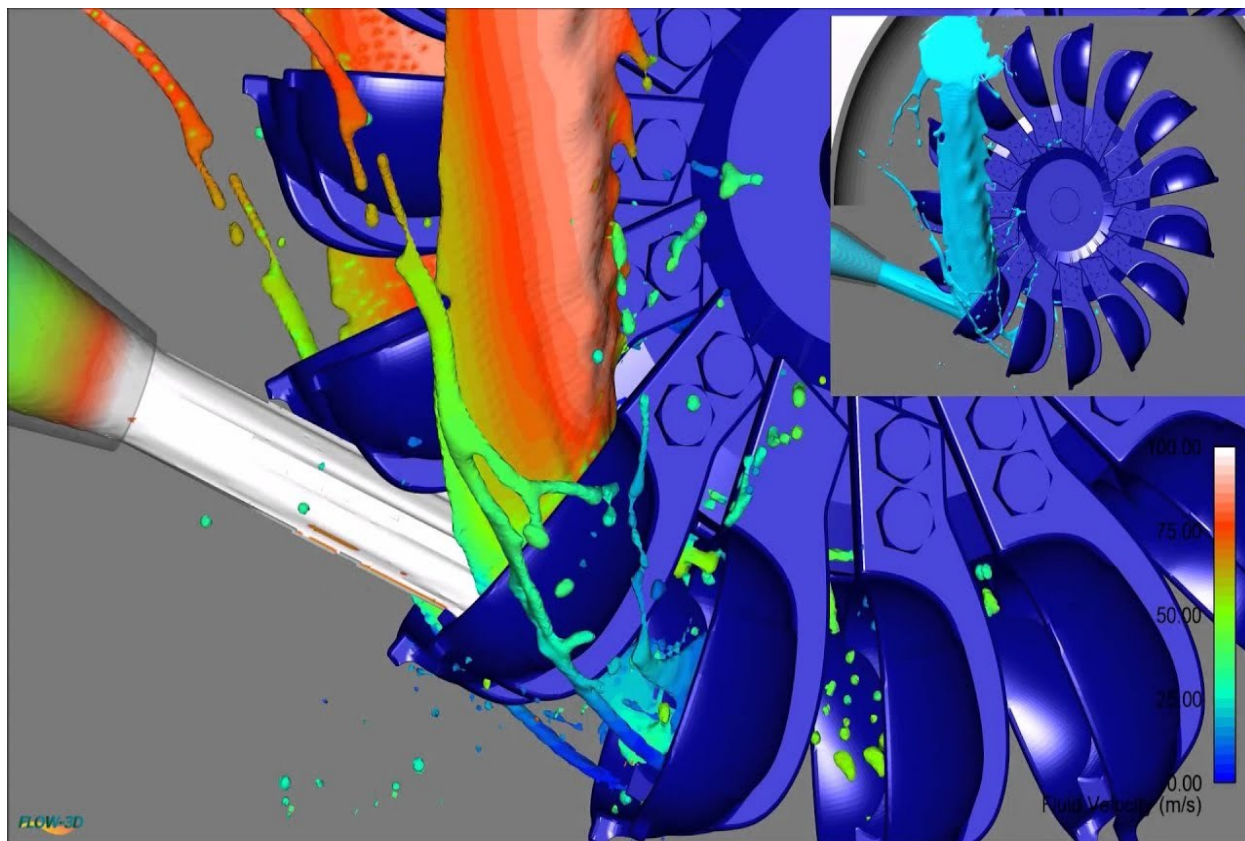
Slika 4.3. Simulacija djelovanja fluida na ulazni kut [15]

4.4. Izlazni kut

Kao i ulazni kut i izlazni kut je jako važan za pravilnu konstrukciju turbine. O njemu ovisi kojom će brzinom i pod kojim kutom fluid napustiti lopaticu turbine. Neki od njegovih utjecaja su:

1. Iskorištenje energije - kada je kut izlaza optimalan, fluid napušta lopaticu s minimalnom preostalom energijom. Odnosno, što je kut kvalitetnije proračunat veća je efikasnost turbine.
2. Smanjuje turbulenciju i gubitke - optimalan kut izlaza smanjuje turbulencije fluida iza lopatica. To pomaže u smanjenju energetske gubitaka i poboljšava stabilnost i kontinuirani rad turbine.
3. Vijek trajanja - smanjenje povratnog udara i otpora smanjuje habanje i stres na lopaticama i drugim komponentama turbine te se time povećava vijek trajanja turbine

Slika 4.4. prikazuje simulaciju djelovanja fluida na lopaticu Peltonove turbine. Na slici je vidljiva važnost izlaznog kuta koji usmjerava fluid van lopatice te se vidi promjena u brzini strujanja fluida na izlazu iz lopatice.



Slika 4.4. Simulacija djelovanja fluida na izlazni kut [14]

4.5. Trenje u lopaticama

U teoretskoj studiji 2007. godine [16], kineski znanstvenik Zhang proučavao je trenje strujanja Peltonove turbine između lopatica u rotaciji i relativnog strujanja fluida. Nakon šta je uzeo u obzir sve parametre, zaključio je da učinkovitost Peltonove turbine uvelike ovisi o trenju rotirajućih lopatice. Trenje dovodi do direktnog utjecaja. Indirektni utjecaj je povezan sa relativnim strujanjem raspodjelom tlaka u lopaticama. Gubici su pretežno u promjeni strujanja i raspodjele tlaka. Radio je na uvjetima protoka na ulazu i udaru mlaza na Peltonovoj turbini te otkrio da volumni protok u rotirajućem sustavu ne ovisi o brzini rotacije lopatice. Proračunima udarnih sila i pripadajućeg rada udara objasnio je postotak ukupne energije udara mlaza. Pogrešan dizajn geometrije lopatice može uzrokovati suprotni moment i kavitaciju. Budući da su turbine dizajnirane za niže specifične brzine, dolazilo bi do erozije pri visokim mlazovima.

4.6. Utjecaj erozije

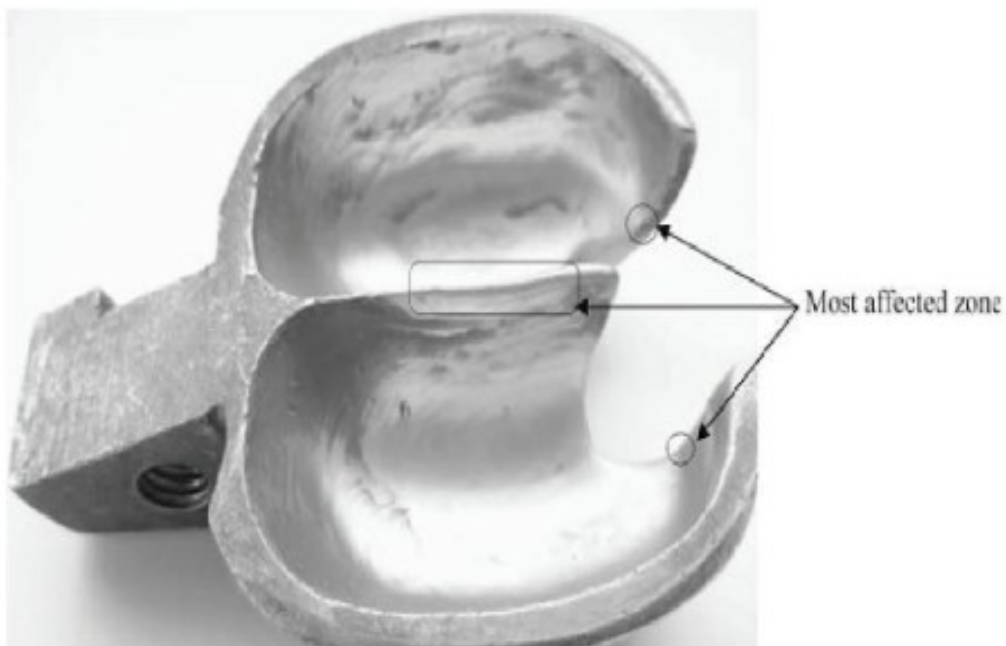
Veliki problem kod Peltonove turbine je erozija. Ona uzrokuje postupno trošenje ključnih dijelova poput mlaznica i lopatica. Istrošene komponente uzrokuju smanjenje učinkovitosti turbine i iziskuju popravke, što uvelike povećava troškove održavanja.

Najveći problem kod erozije je to što se unatoč naporima ne može potpuno ukloniti, već se samo može smanjiti primjenom odgovarajućih preventivnih mjera i tehnika zaštite površina.

Zbog toga se svakodnevno provode brojna istraživanja u nadi kako bi se došlo do rješenja kojim bi se erozija smanjila na zanemarujući niski nivo.

Provedeno je istraživanje 2008. godine [17] u kojem su znanstvenici proučavali problem erozije mlaznica i lopatica Peltonove turbine u himalajskoj regiji. Istraživanje je provedeno na hidroelektrani Chilime u Nepal, gdje su provedena detaljna istraživanja o brzini erozije i smanjenju učinkovitosti. Procijenjeno smanjenje učinkovitosti iznosilo je 1.21%, što je posljedično rezultiralo gubitkom proizvodnje električne energije. Kvarc i feldšpat bili su glavni minerali sadržani u riječnoj vodi. Teška erozija opažena je pri djelomično otvorenom stanju zbog dodatnog učinka kavitacije. Predloženi su zaobilazni tuneli i redovito uklanjanje mulja kako bi se smanjila erozija i kako bi se povećala učinkovitost.

Sličan tip istraživanja proveli su Padhy i Saini 2009.godine. [8] Istraživali su utjecaj veličine, tvrdoće i koncentracije čestica mulja, brzine protoka, svojstava osnovnog materijala komponenata turbine i radnih sati turbine na fenomen erozije u stvarnim uvjetima. Eksperimentalne studije provedene su na malom modelu Peltonove turbine. Na temelju eksperimentalnih podataka razvijene su korelacije između stope trošenja i lopatica Peltonove turbine kao funkcije veličine i koncentracije čestica mulja te brzine mlaza. Izgled lopatica nakon završetka eksperimenta je prikazan na slici 4.5.



Slika 4.5. Površina lopatice nakon eksperimenta [8]

5.1. Autodesk Inventor Professional 2023

Američka tvrtka Autodesk, osnovana je 1982. godine. Tvrtka se bavi razvojem softverskih rješenja za industrije koje se bave projektiranjem i inženjerstvom. Autodesk je tijekom godina postao globalni lider u pružanju alata za dizajn i inženjering. Ponajviše uspjeha su ostvarili u područjima 2D i 3D dizajna. Velika većina tvrtki i inženjera koriste Autodeskove softvere u kojima prednjače Autodesk Autocad i Autodesk Inventor Professional. Autodesk Autocad je najkorišteniji svjetski softver za dvodimenzionalno dizajniranje dok je Autodesk Inventor Professional jedan od najkorištenijih softvera za 3D projektiranje, zajedno sa Catiom, SolidWorksom i Autodesk Fusionom. [4]

Autodesk Inventor Professional je prvi puta izdan 1999.godine. Softver se primarno koristi u strojarskom inženjerstvu i industrijskom dizajnu za kreiranje, simulaciju i vizualizaciju digitalnih prototipova proizvoda, čime se omogućava optimizacija dizajna i smanjenje troškova razvoja. Softver koristi parametarsko modeliranje, gdje se geometrijski odnosi između dijelova definiraju pomoću parametara i formula, omogućujući jednostavne izmjene i korekcije komponenti. Pomoću softvera Inventor, inženjeri mogu kreirati virtualni model konačnog proizvoda kako bi provjerili njegov oblik, uklapanje i funkcionalnost prije fizičke izrade. Softver nudi snažne alate za modeliranje, podršku za prevođenje između različitih CAD formata te izvorne DWG (dvodimenzionalne i trodimenzionalne) crteže, što omogućava smanjenje troškova razvoja, stvaranje vrhunskih proizvoda i brži plasman proizvoda na tržište.

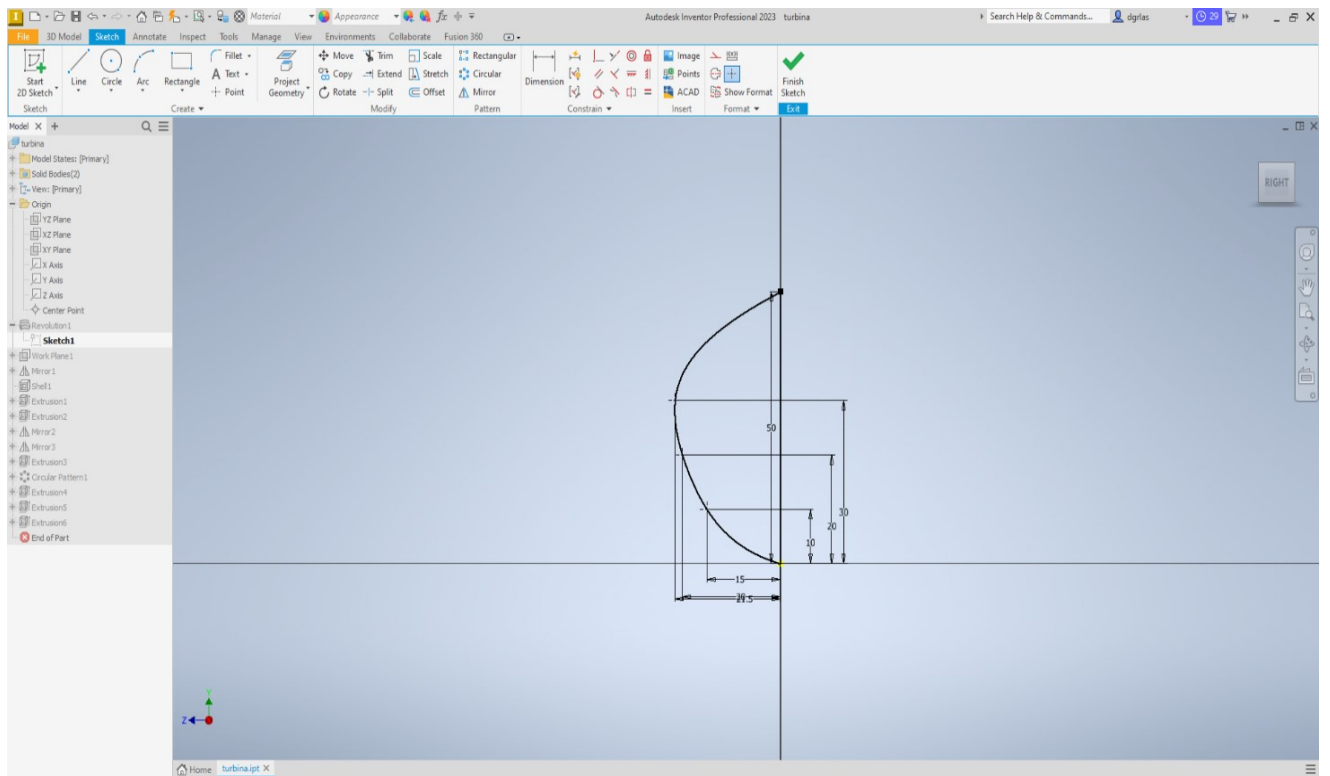
Tijekom godina Autodesk Inventor Professional je prošao kroz mnoštvo promjena. Autodesk je uspostavio tradiciju izdavanja nove verzije softvera svake godine, koja je u skladu s najnovijim otkrićima i tehnološkim napretkom.



Slika 5.2.. Zaslona za učitavanje verzije 2023

5.2. Izrada lopatice

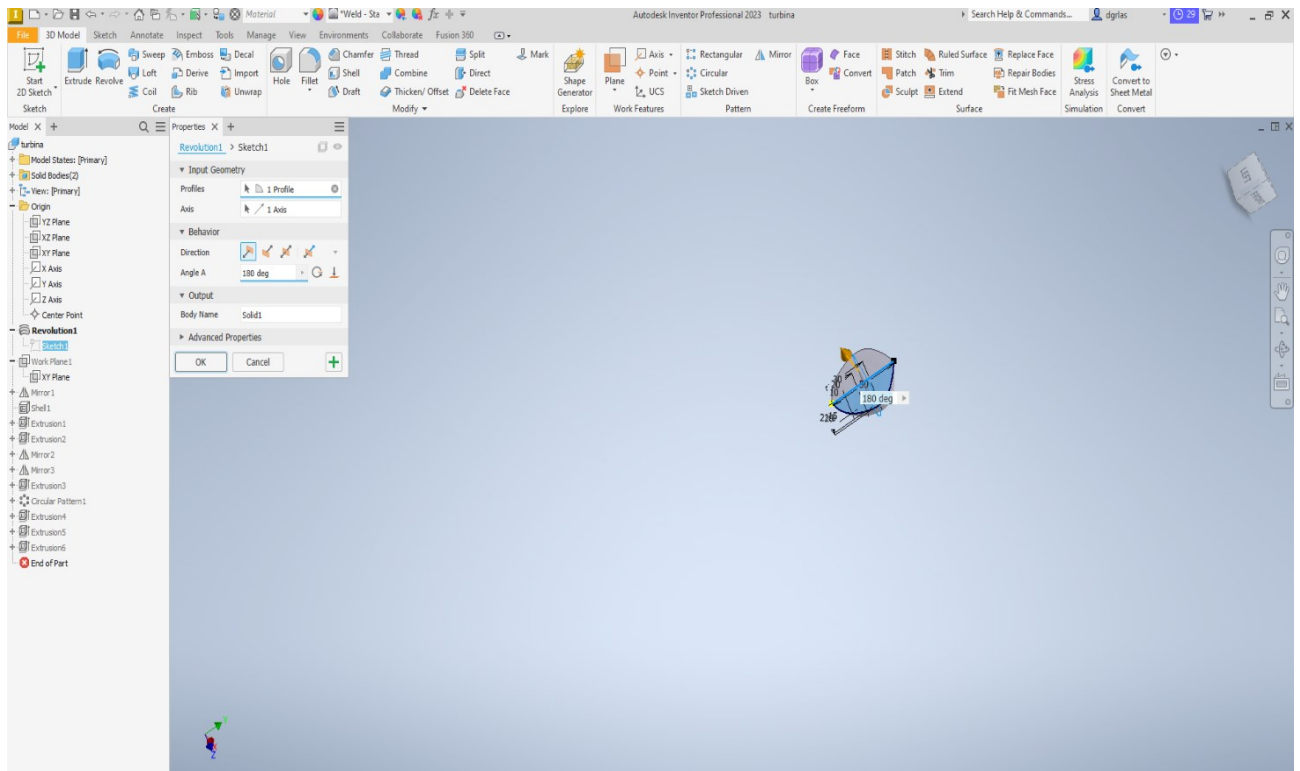
Ulazak u ravninu Y-Z predstavljao je početak procesa crtanja bočnog prikaza lopatice unutar programa Autodesk Inventor. Pristup ovom zadatku obuhvatio je upotrebu naredbe "point", gdje su odabrane tri točke za definiranje bočnog profila lopatice. Korištenjem naredbe "dimension", dimenzije tih točaka su precizirane u odnosu na ishodište koordinatnog sustava (slika 5.3.). Konačni korak u ovom segmentu bio je primjena naredbe "spline" radi povezivanja odabranih točaka, čime je stvorena glatka krivulja predstavljajući oblik lopatice.



Slika 5.3. Sketch izrade lopatica

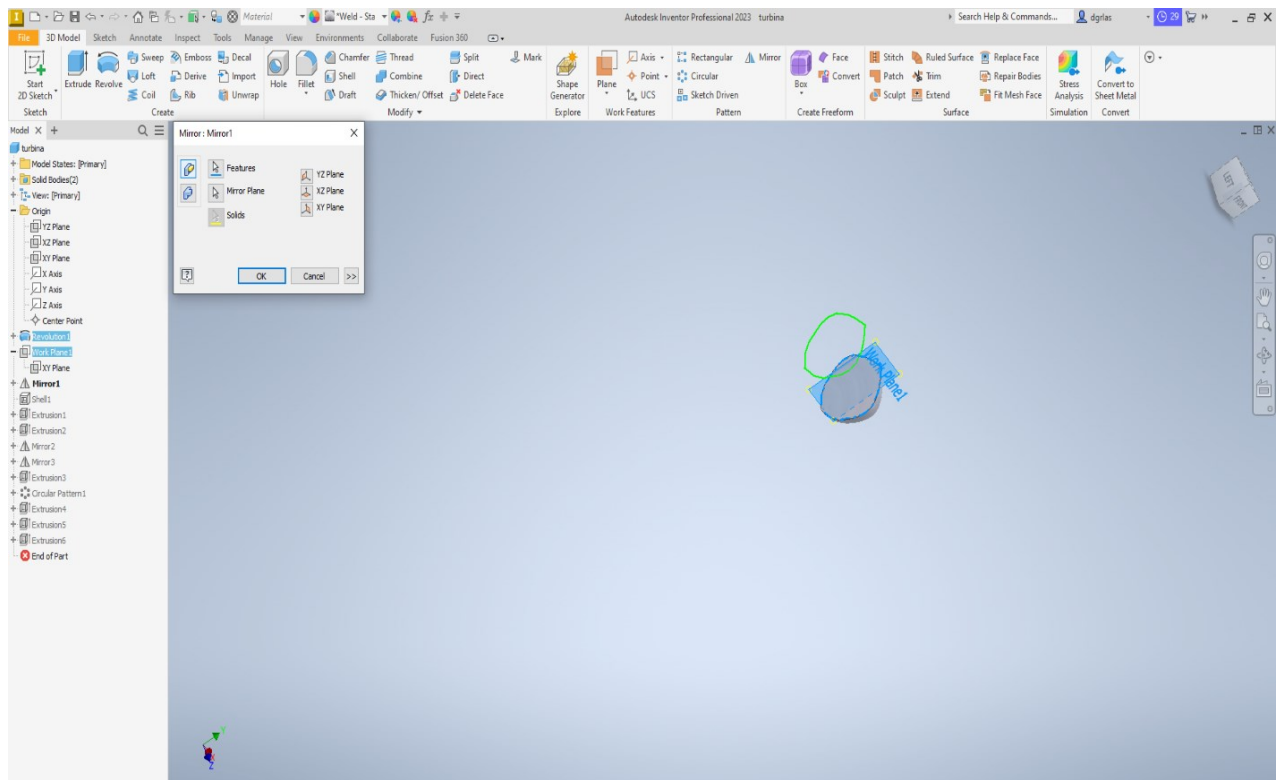
Za dobivanje trodimenzionalnog oblika lopatice koristi se naredba "revolution".

Pomoću navedene naredbe, prethodni crtež lopatice rotira se za 180° oko osi Y. Provedba naredbe "revolution" je vidljiva na slici 5.4.



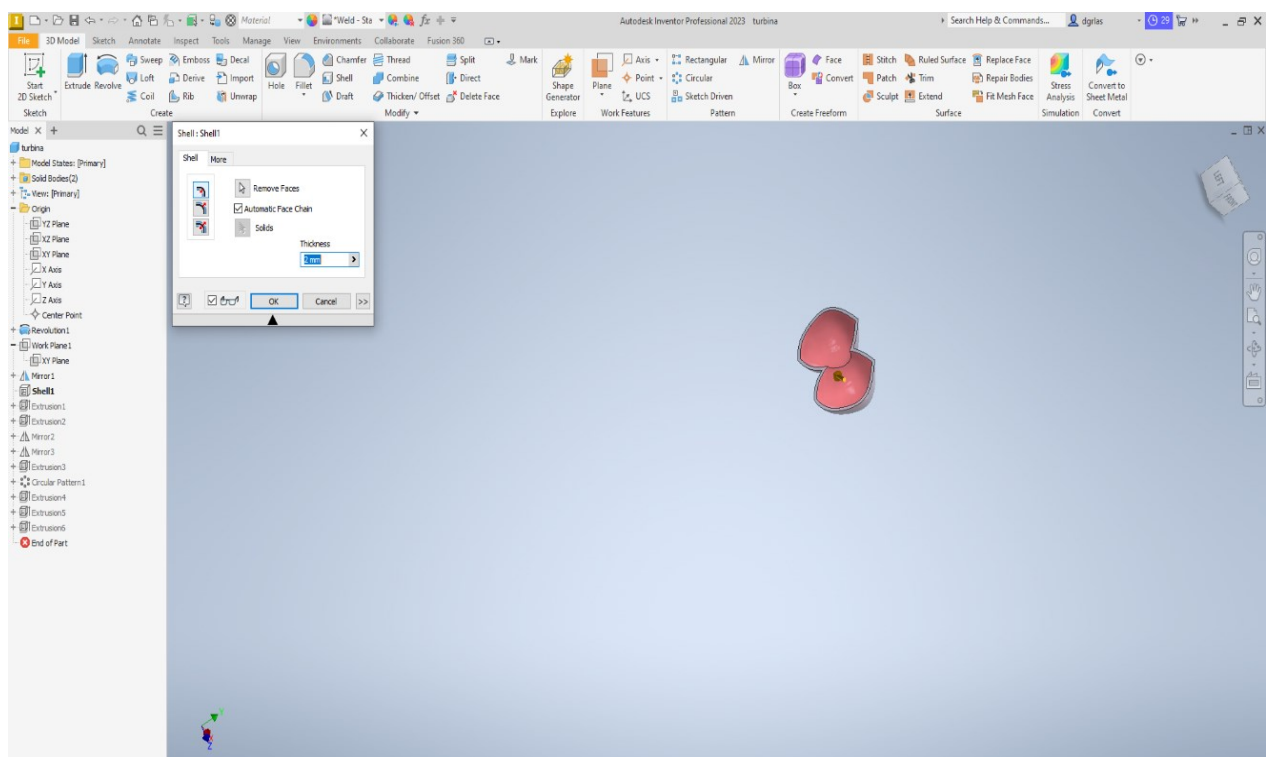
Slika 5.4. Revolution oko Y osi

Realizacija drugog dijela lopatice obavljena je odabirom ravnine XY. U skladu s tom ravninom, primjenom naredbe 'mirror' izvedeno je dupliciranje izgleda lopatice iz prethodnog koraka (Slika 5.5.). Fokus je bio usmjeren na precizno postavljanje odabrane ravnine kako bi se prilikom primjene 'mirror' naredbe postigao kontakt između nove i prethodno definirane strane lopatice



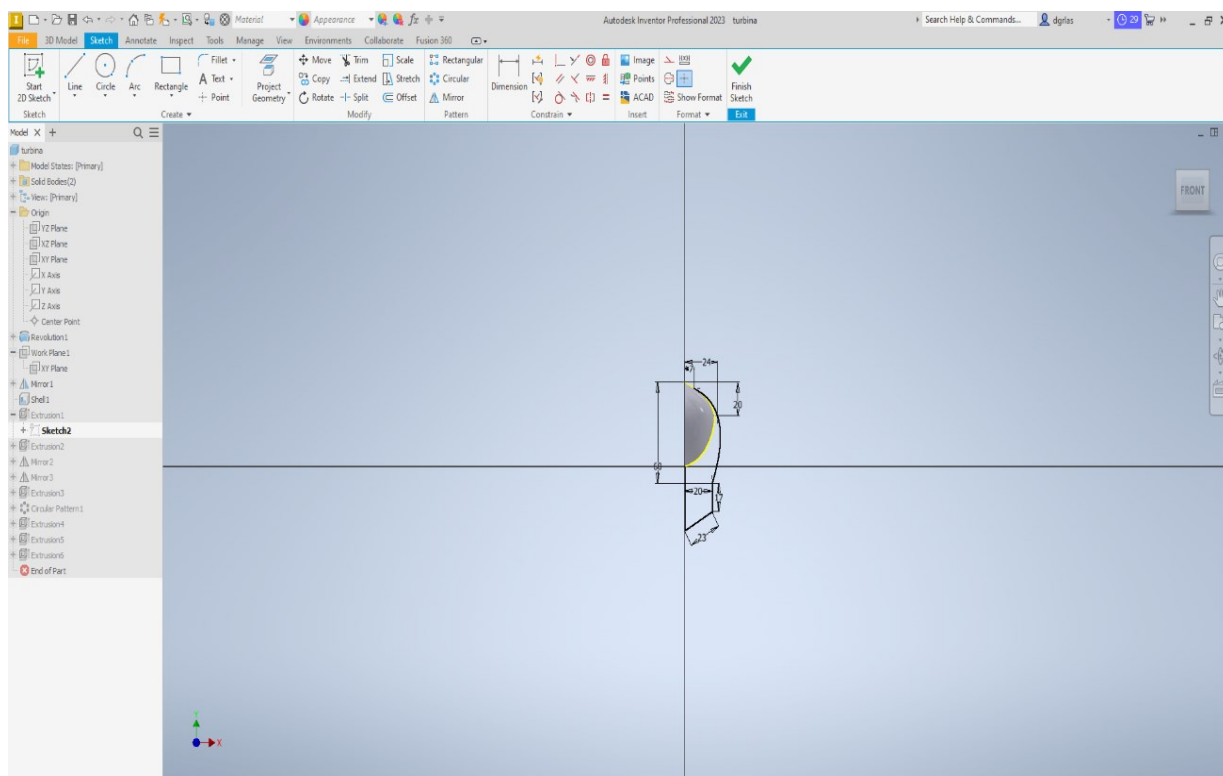
Slika 5.5. Izrada druge strane lopatice

Provođenje bušenja kroz puni profil lopatice izvedeno je upotrebom naredbe 'shell', s ciljem postizanja lopatice debljine 2 mm (slika 5.6.).



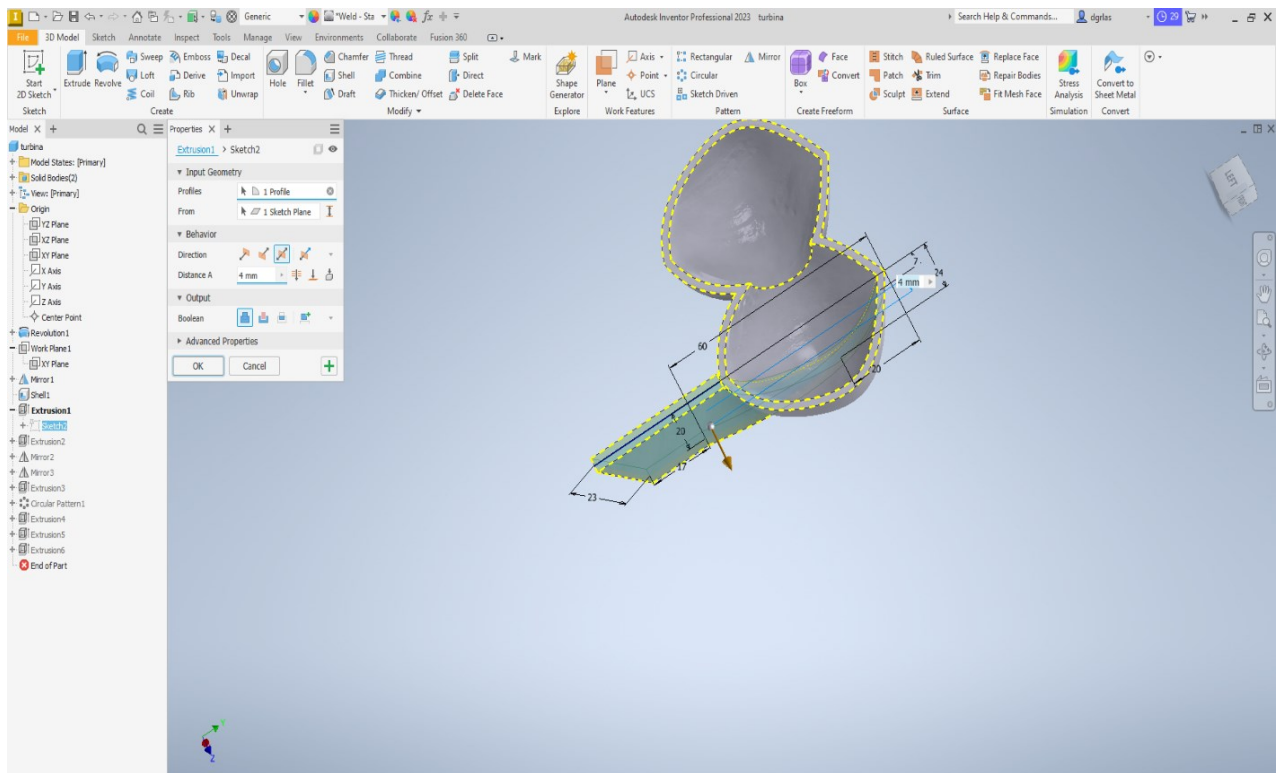
Slika 5.6. Naredba „shell„

Pristup ravnini XY izvršen je kako bi se putem naredbe 'sketch' izradio dio koji povezuje lopaticu s tijelom turbine, odnosno tijelom lopatice. Za ovaj korak, kao i u prethodnim fazama, korištena je naredba 'point'. Ponovno su odabrane tri točke, kojima su određene dimenzije, te je zatim izrađen i zatvoren 'sketch' (slika 5.7.).



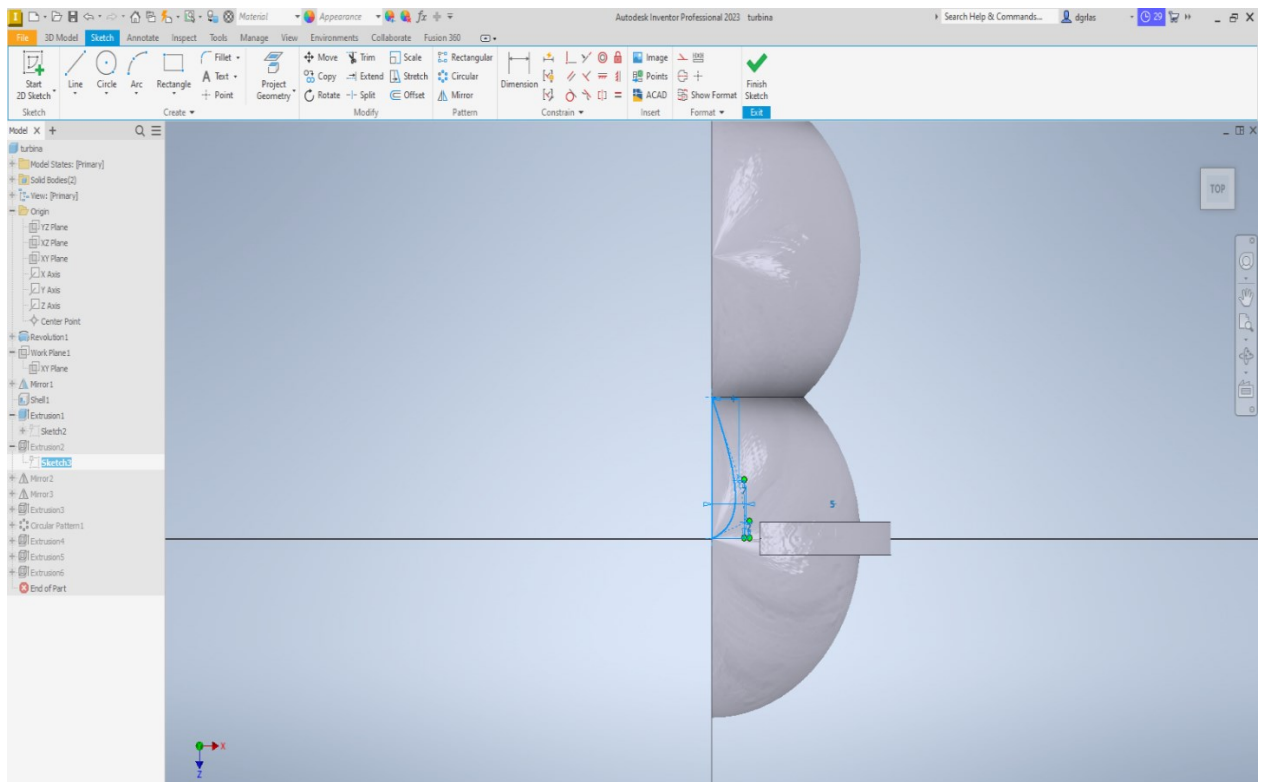
Slika 5.7. Izrada tijela lopatice

Nadalje, primjenom naredbe 'extrude', formira se tijelo jednog dijela lopatice s debljinom od 4 mm. Na koje će se naknadno spojiti rotor. Taj korak je vidljiv na slici 5.8.

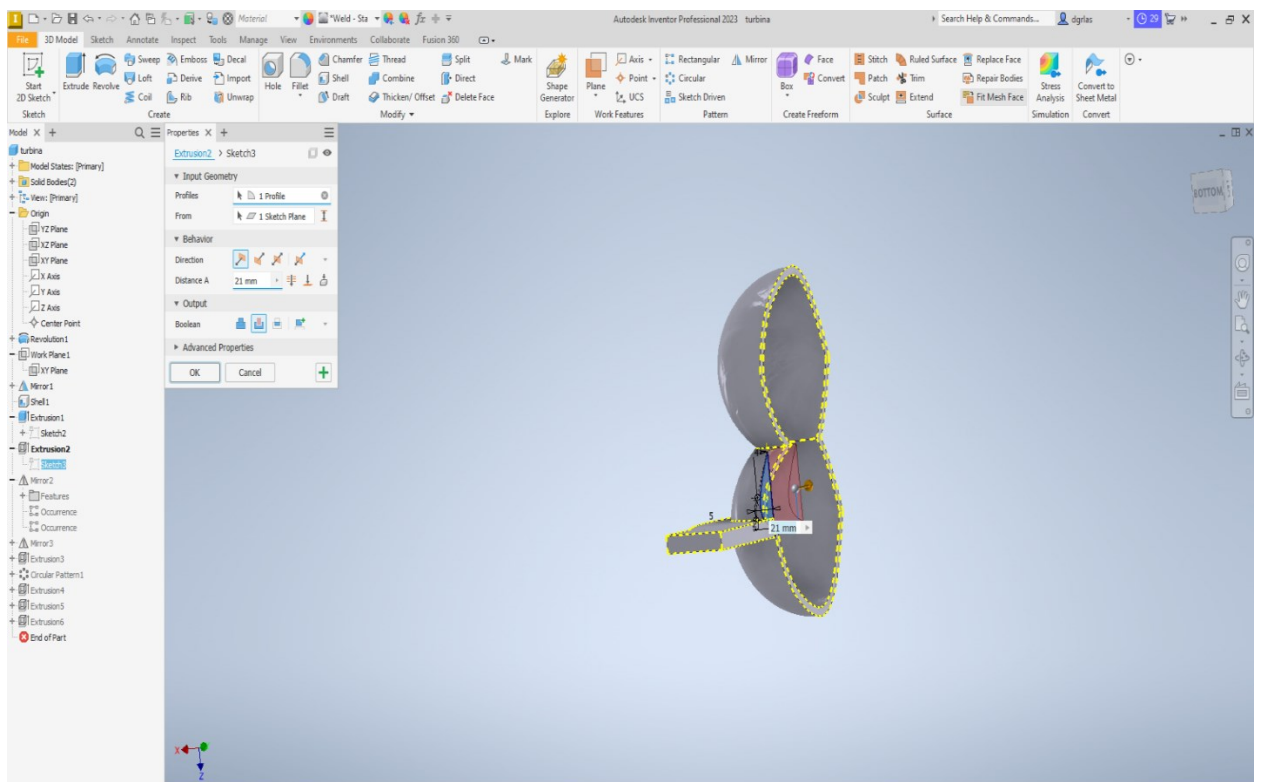


Slika 5.8. „extrusion,, tijela lopatice

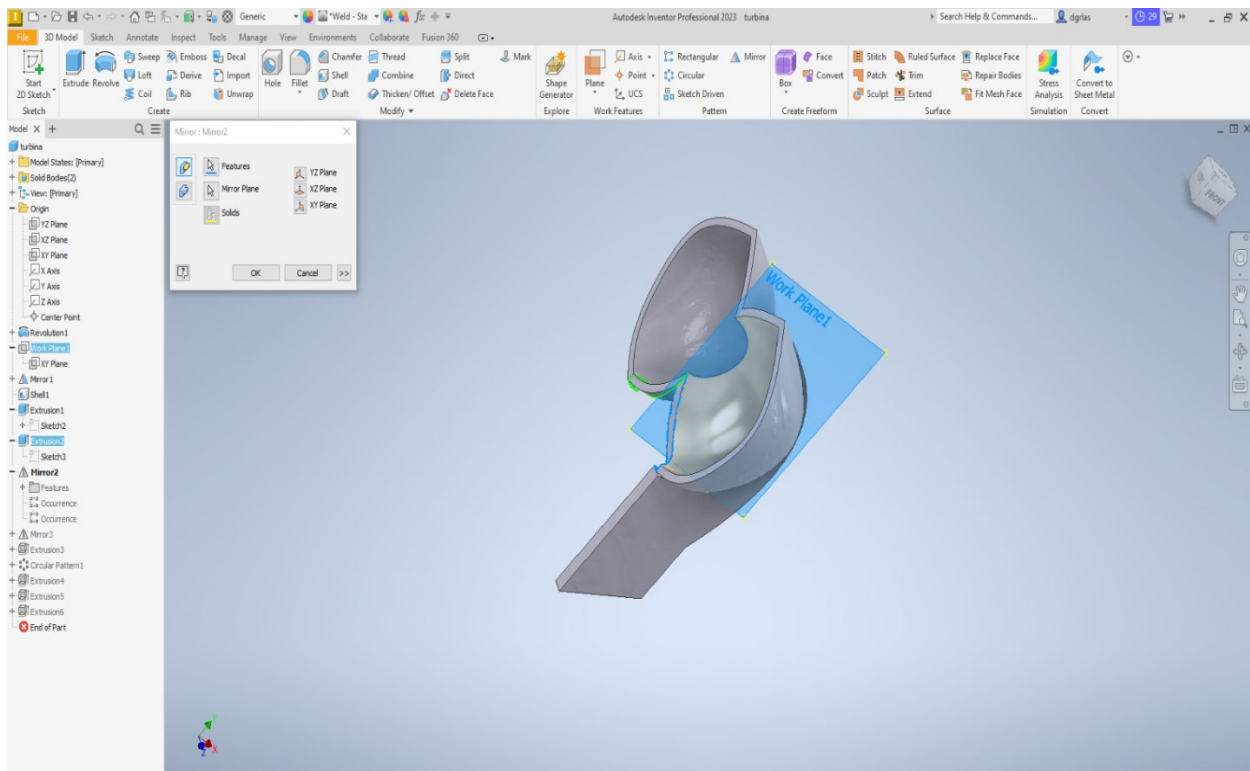
S obzirom da Peltonove lopatice 'režu' mlaz vode, bilo je nužno oblikovati dno lopatica s određenim prorezom umjesto potpuno kružnog presjeka. U tu svrhu, početno je odabrana ravnina XZ, a zatim su korištenjem naredbe 'point' izabrane četiri točke. Jedna od tih točaka bila je usporedna sa središtem tijela lopatice, dok su druge dvije bile proizvoljno odabrane, a četvrta točno na središtu između dviju strana lopatice. Pomoću naredbe 'spline', oblik je oblikovan i zatvoren (Slika 5.9.). Nadalje, potrebno je bilo izrezati nacrtani profil iz lopatice, što je vidljivo na slici 5.10. Korištenjem naredbe 'extrude', postignut je željeni oblik jednog dijela lopatice. Da bi se taj oblik primijenio i na drugu stranu lopatice, upotrijebljena je naredba 'mirror'. Označen je prethodni 'sketch', a s obzirom na ravninu XY dobiven je željeni oblik dna lopatice (slika 5.11.).



Slika 5.9. Crtanje oblika za prorez vrha lopatice

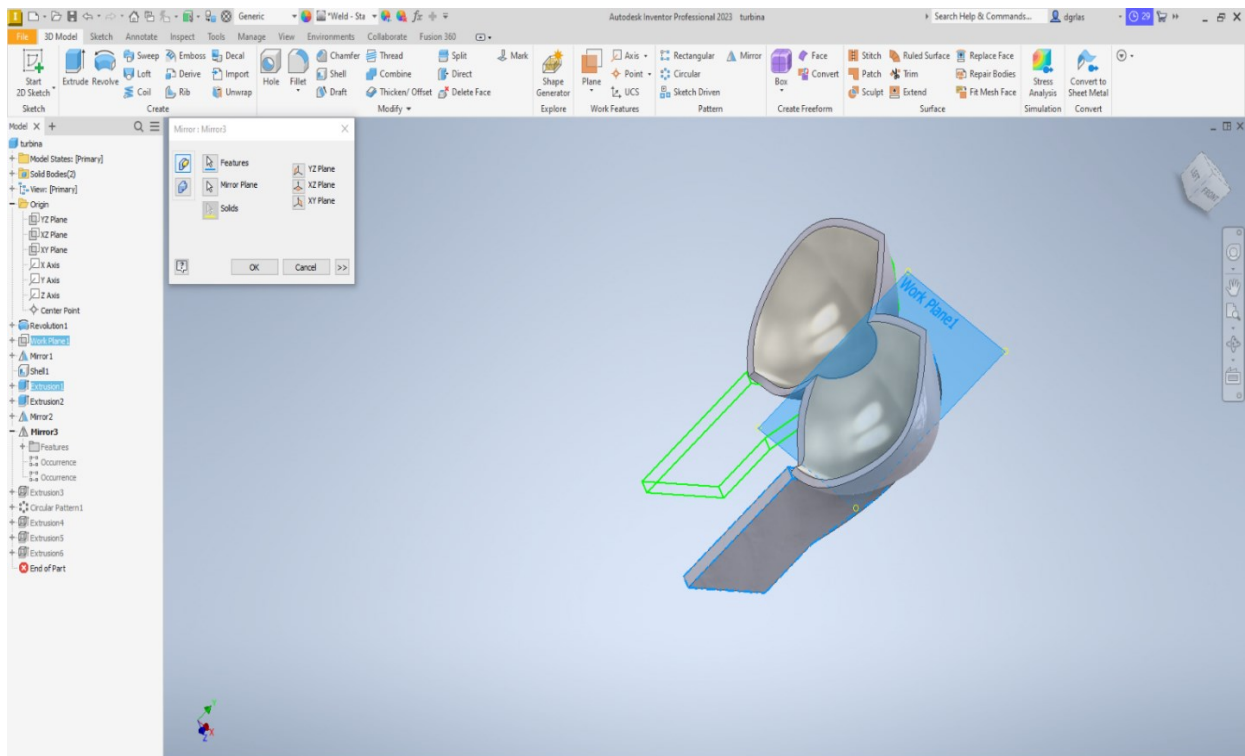


Slika 5.10. Rezanje jednog dijela lopatice



Slika 5.11. Rezanje dna uporabom naredbe „mirror„

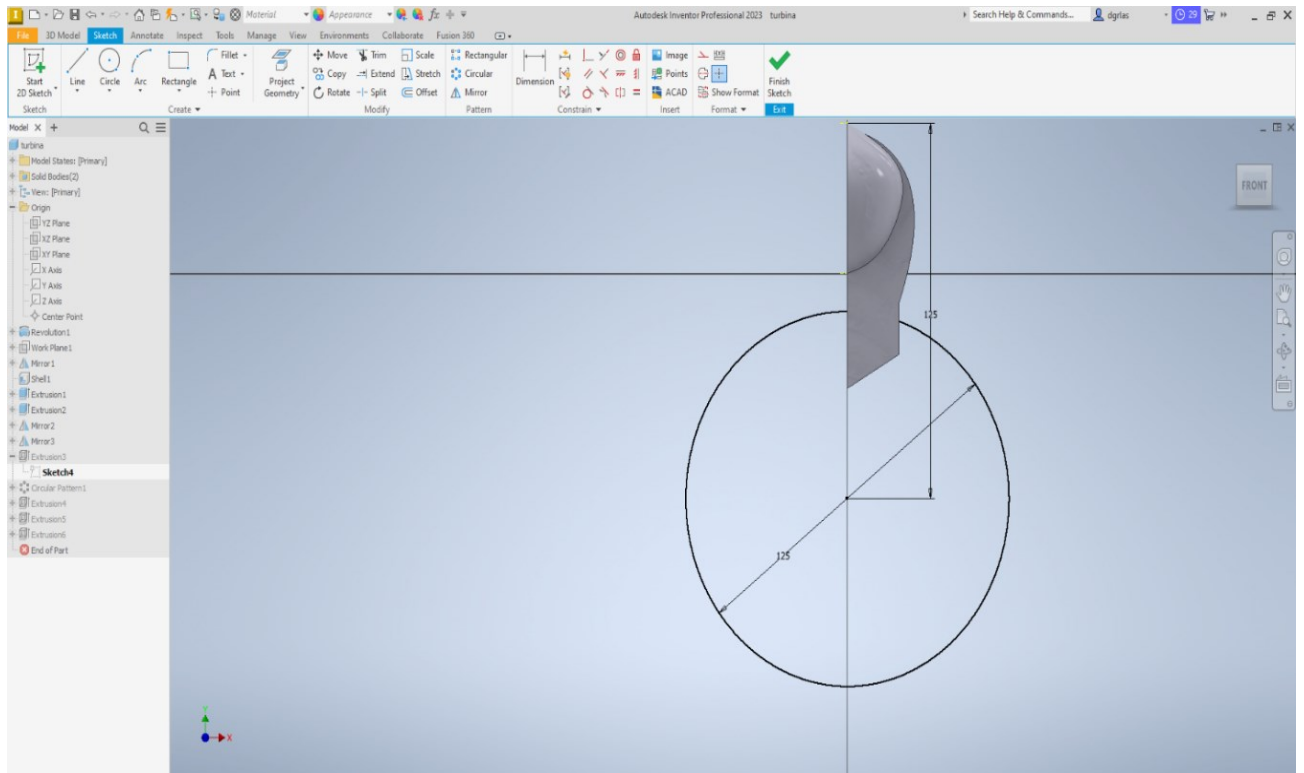
Završni korak obuhvatio je primjenu naredbe "mirror" uz korištenje prethodno definirane ravnine XY. Cilj je bio dobiti tijelo lopatice na drugoj strani, koristeći simetriju pomoću navedene ravnine. Završni korak izrade lopatice, prikazan je na slici 5.12.



Slika 5.12. Izrada tijela lopatice na drugoj strani lopatice

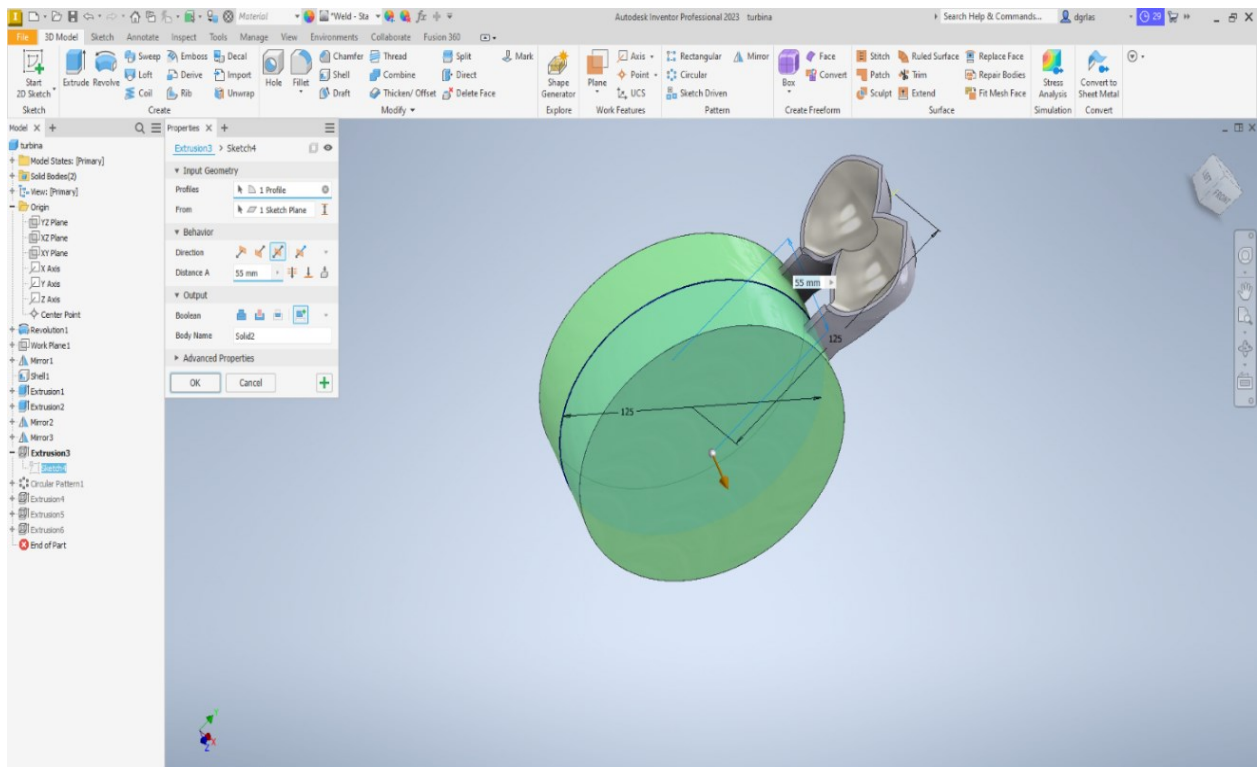
5.3. Izrada rotora

Ulaskom u ravninu XY, izrađen je krug s radijusom od 125 mm. Udaljenost tog kruga od vrha lopatice odabrana je kao 125 mm (slika 5.13.) .



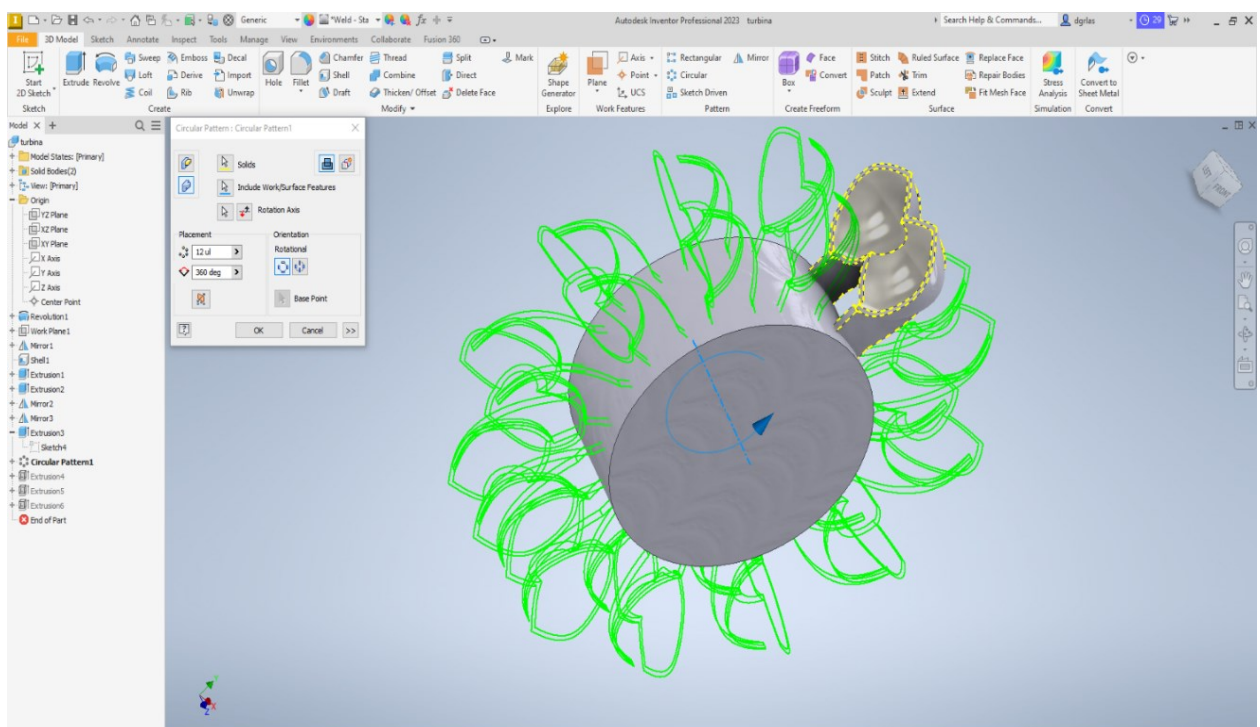
Slika 5.13. Crtanje rotora

Dodana je trodimenzionalnost rotoru turbine primjenom naredbe "extrude". Trodimenzionalnost rotora je vidljiva na slici 5.14.



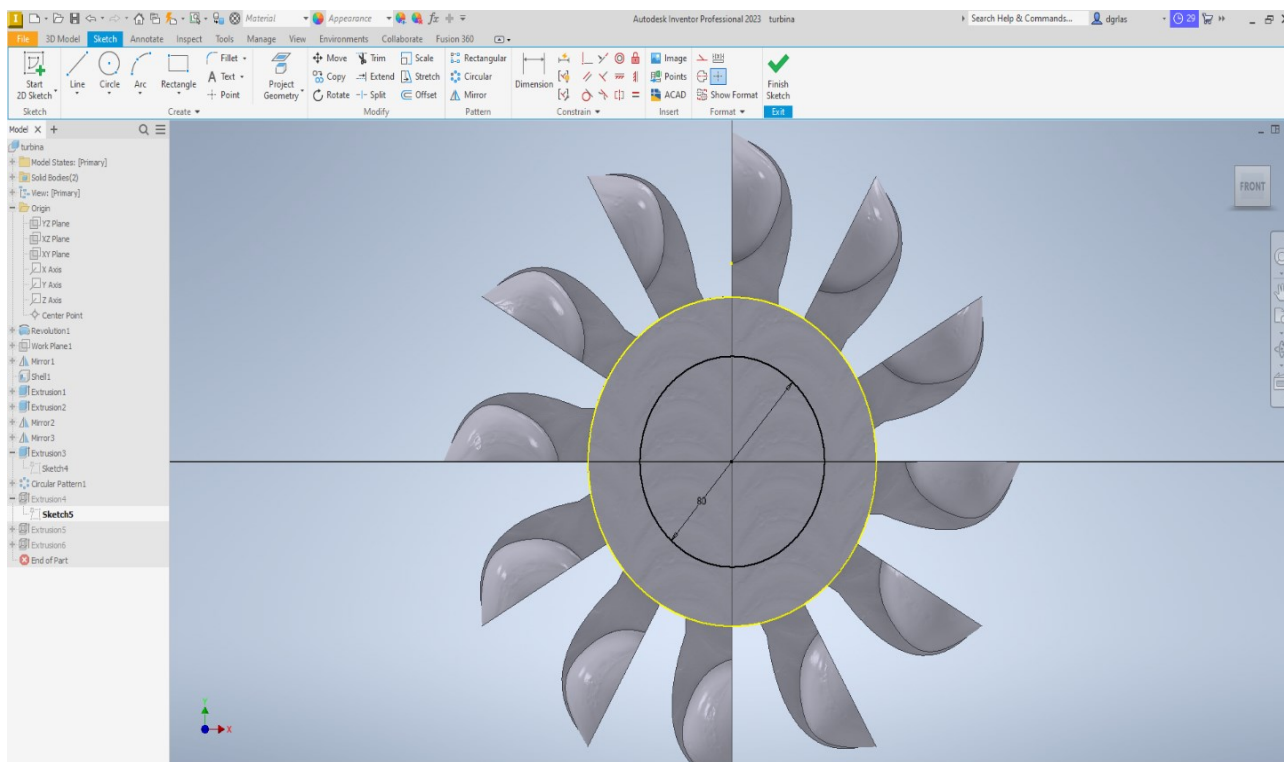
Slika 5.14. Izrada rotora turbine

Korištena je naredba "circular pattern" kako bi se generirale lopatice duž cijele turbine. Nakon odabira naredbe bilo je potrebno odabrati rotaciju oko Z-osi i da se tijekom 360° formira ukupno 12 lopatica (slika 5.15.).

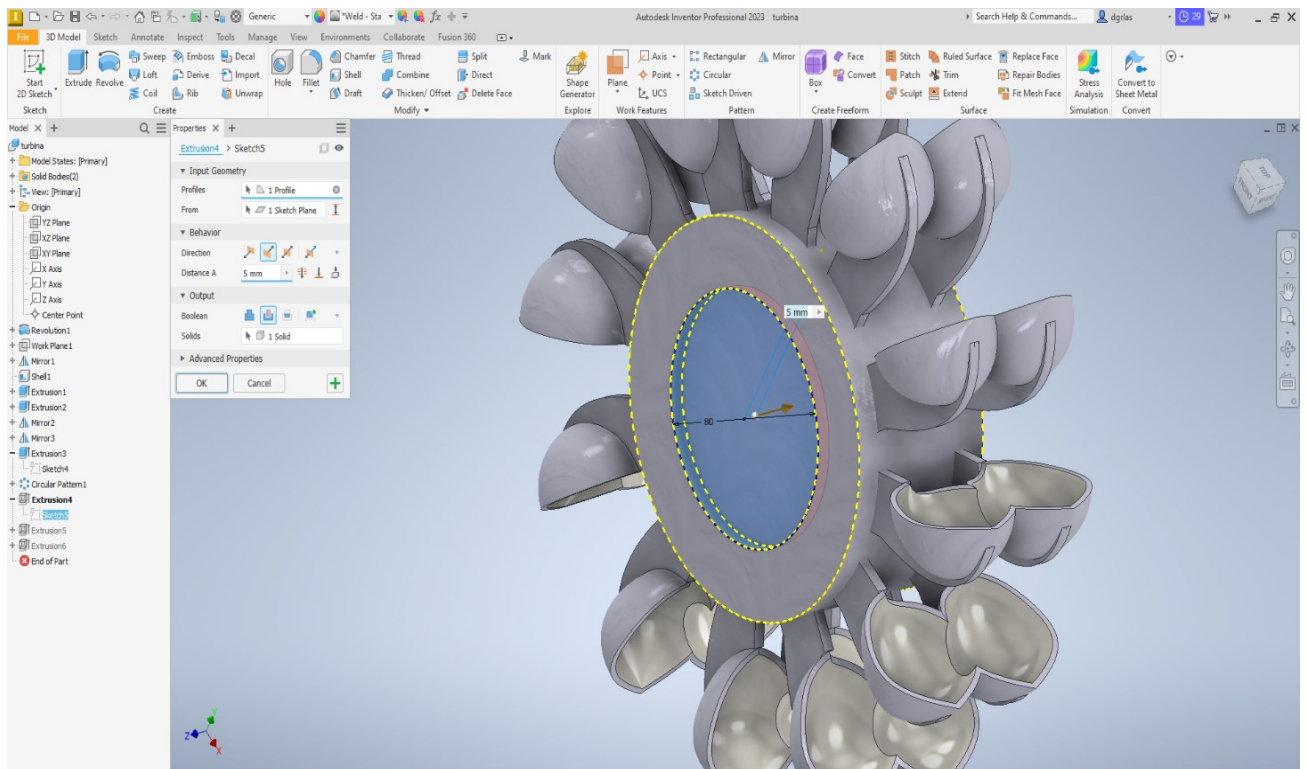


Slika 5.15. Crtanje lopatica po cijeloj turbini

Peltonova turbina sadrži jedinstveni dio rotora s manjim presjekom, na kojem se nalaze otvori za pričvršćivanje ili montažu turbine na određeni element. Da bi se dobio taj uvučeni dio, pristupljeno je ravnini XY gdje je nacrtana kružnica s manjim radijusom od radijusa rotora turbine, ali s istim središtem. Nakon završetka skice, primijenjena je naredba "extrude" kako bi se stvorio uvučeni dio s debljinom 7 mm manjom od ostatka rotora. Navedeni koraci su vidljivi na slikama 5.16. i 5.17.

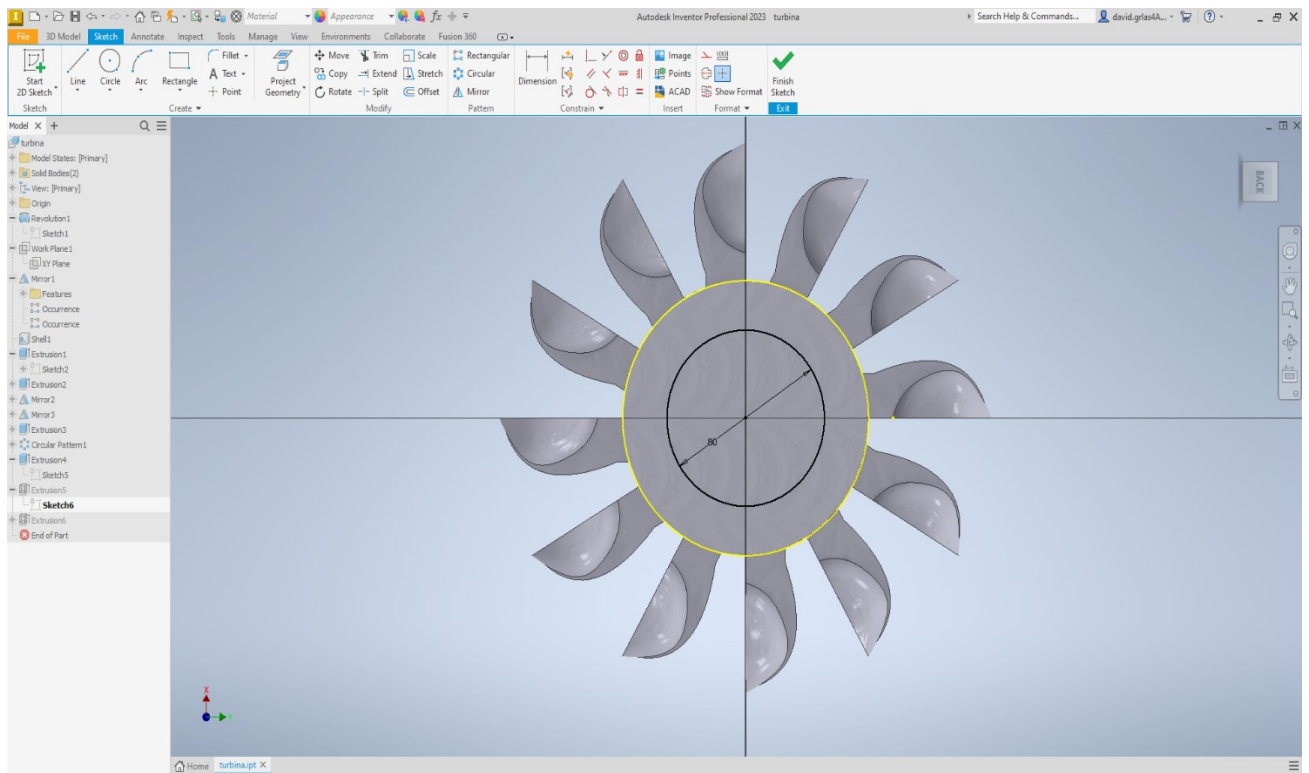


Slika 5.16. Crtanje kružnice radijusa 80mm

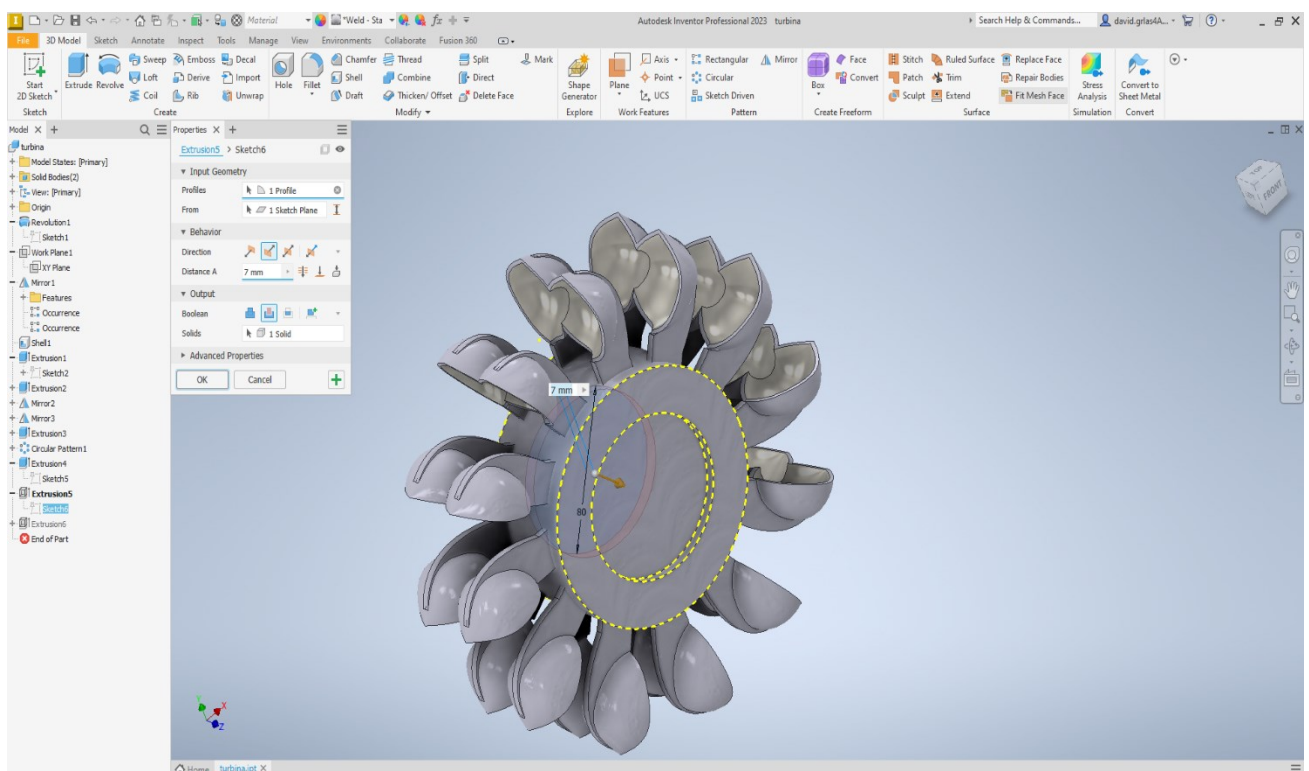


Slika 5.17. Uvlačenje rotora turbine

Zbog simetričnosti rotora bilo je potrebno ponoviti prethodne postupke i na stražnjoj strani turbine. Zbog toga je bilo potrebno otvoriti novi „sketch” u ravnini XY i poravnati središte „sketcha” sa središtem rotora. Nakon ponovnog crtanja kružnice, ponovo se pristupilo uporabi naredbe extrude za uvlačenje površine kružnice (slike 5.18. i 5.19.).

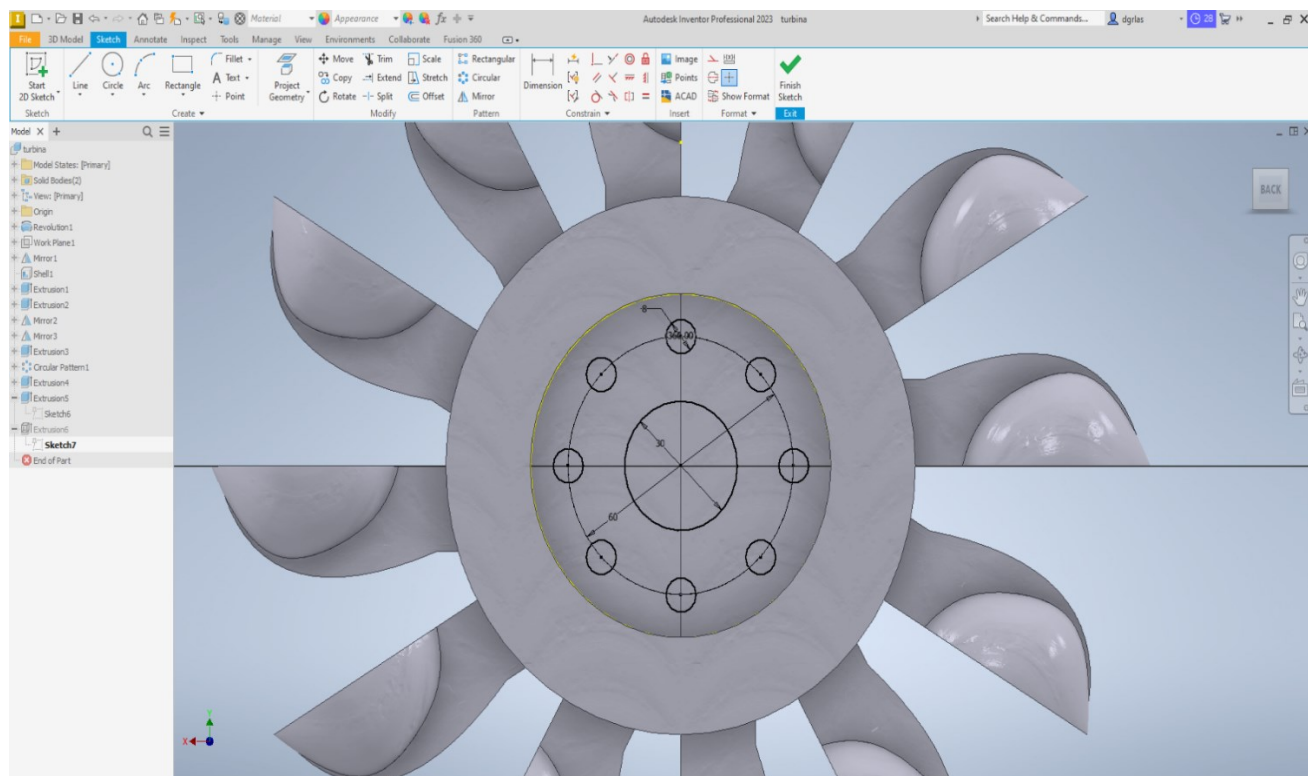


Slika 5.18. Crtanje kružnice na poledini rotora



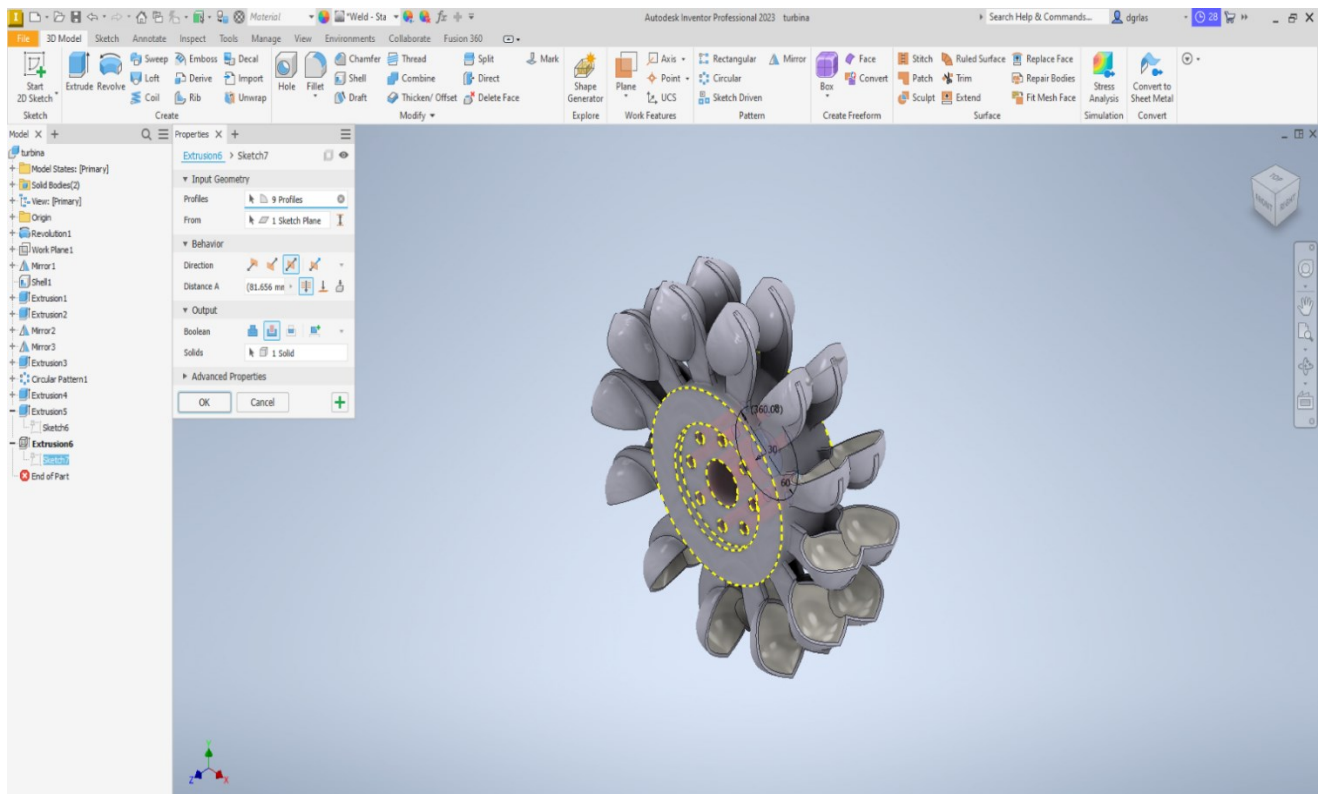
Slika 5.19. Uvlačenje rotora turbine na poledini rotora

Ulaskom u ravninu XY, nacrtana je jedna kružnica promjera 30 mm, a zatim još jedna promjera 60 mm. Kružnica promjera 30 mm predviđen je kao provrt koji će omogućiti prolaz određenog radnog elementa kroz turbine, ukoliko bude potrebno. Kružnica promjera 60 mm, označen je naredbom "construction", kako bi poslužila kao referentna kružnica za smještaj ostalih provrta. Nakon toga, na navedenoj referentnoj kružnici izrađena je još jedna kružnica promjera 8 mm. Konačni korak uključivao je primjenu naredbe "circular" kako bi se stvorilo još sedam kružnica istih dimenzija na referentnoj kružnici. Crtanje provrta je vidljivo na slici 5.20.



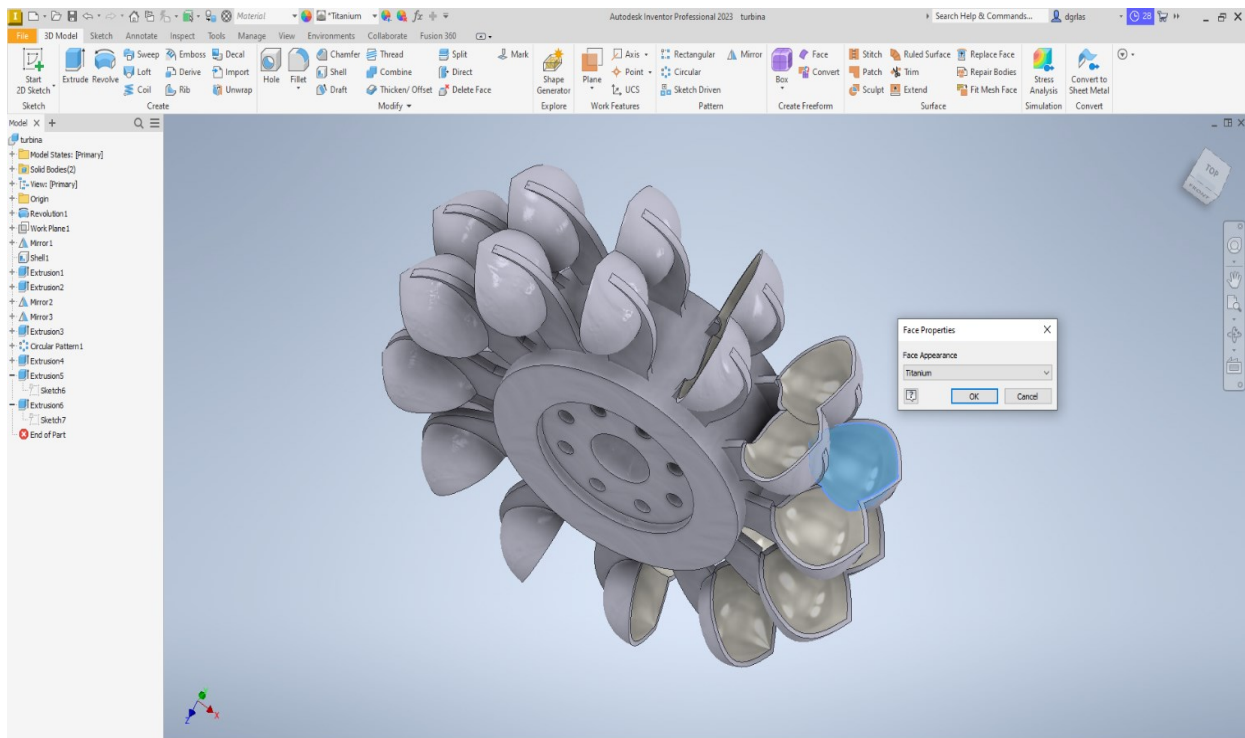
Slika 5.20. Crtanje provrta

Za bušenje provrta primijenjena je naredba "extrude", gdje su označene sve prethodno nacrtane kružnice. Korištene su opcije "cut" i "through all" kako bi se sve kružnice probušili kroz cijeli presjek, stvarajući željene provrte. Izrada provrta pomoću naredbi "extrude", "cut" i "through all" je vidljiva na slici 5.21.



Slika 5.21. Izrada provrta

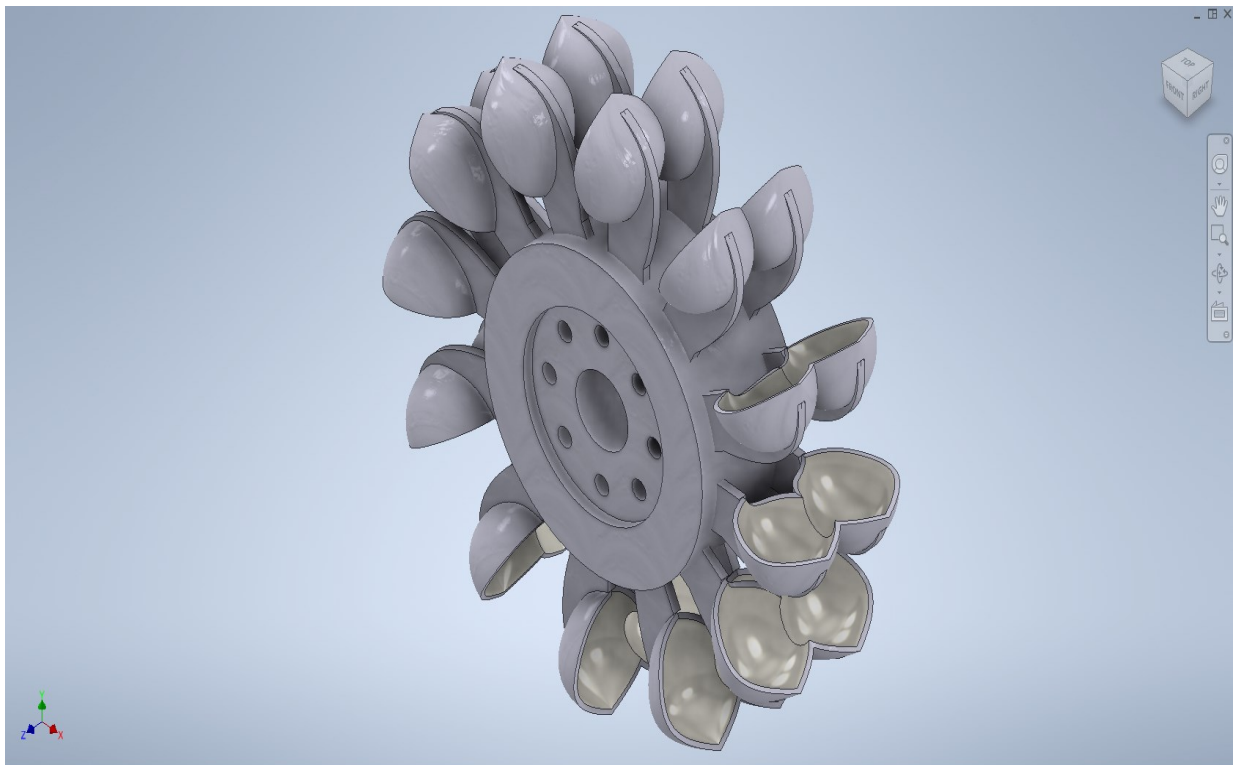
Posljednji korak izrade (slika 5.22.) bila je promjena materijala turbine, kako bi odgovarala stvarnim materijalima Peltonove turbine. Peltonove turbine se obično izrađuju od nehrđajućih čelika, dok se lopatice izrađuju od različitih materijala.



Slika 5.22. Materijal lopatica

5.4. Završni izgled Peltonove turbine u Autodesk Inventor

Završni izgled Peltonove turbine je prikazan na slici 5.23.



Slika 5.23. Završni izgled turbine

6. ZAKLJUČAK

Peltonova turbina je jedan od izuma koji su promijenili čovječanstvo. Njen izum je omogućio ogroman iskorak u hidroenergetici jer se napokon iskoristivost turbine povećala toliko da je ulaganje u hidroenergetiku postalo isplativo. Bez Peltonove turbine imali bismo velike gubitke prilikom pretvorbe energije vode u električnu energiju, što bi značajno ograničilo razvoj hidroenergetskih postrojenja.

Na temelju istraživanja literature provedenog u ovom radu vidljivo je da postoje mnogi faktori koji utječu na iskoristivost turbine i da postoji značajan prostor za napredak i povećanje učinkovitosti turbine. Jasno je da je turbina daleko od savršenog izuma, ali s obzirom na to da drugi mehanizmi nemaju niti približno veliku iskoristivost, Peltonova turbina ostaje nezamjenjiv alat u hidroenergetici.

U sklopu ovog rada napravljena je geometrija Peltonove turbine. Na temelju izrađene geometrije bi se moglo pristupiti izradi numeričkih simulacija strujanja fluida ili strukturalnih analiza. Pomoću numeričkih simulacija bi se mogle napraviti analize navedenih poboljšanja lopatica i pobliže objasniti sva opterećenja i gubici koji se događaju prilikom rada Peltonove turbine.

7. LITERATURA

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics
- [2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Peltonova_turbina
- [3] <https://3dexport.com/3dmodel-pelton-turbine-impeller-247324.htm>
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk>
- [5] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/peltonova-turbina>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Lester_Allan_Pelton
- [7] Čarija Z.: „Vodne turbine“, radni materijal predavanja kolegija Hidraulički strojevi
- [8] Padhy, M.K. and Saini, R.P., 2009, „Effect of Size and concentration of Silt Particles on Erosion of Pelton Turbine“
- [9] <https://mjmhydro37.weebly.com/data-maps-and-graphs.html>
- [10] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodenice>
- [11] <https://www.obnovljivi.com/energija-vode>
- [12] <https://www.jutarnji.hr/vijesti/svijet/najveca-svjetska-hidroelektrana-izdrzala-je-rekordne-poplave-prizori-su-spektakularni-15015377>
- [13] <http://sr.hydro-electricity.eu/pelton/>,
- [14] FLOW-3D „ Advanced Visualization of Pelton Turbine Simulation,,
- [15] <https://www.stellba-hydro.de/en/water-turbines/pelton-turbine/>
- [16] Zhang, Zh., 2009, Inlet flow conditions and Jet Impact Work in a Pelton Turbine
- [17] Bajracharya, T.R., Acharya, B., Joshi, C.B., Saini, R.P. and Dahlhaug, O.G., " Sand erosion of Pelton turbine nozzles and buckets: A case study of Chilime Hydropower Plant" Wear 264.3-4 (2008): 177-184
- [18] Bhattarai Suyesha , Vichare Paraga, Dahal Keshava, Al Makky Ahmeda, Olabi Abdul-Ghanic "Novel trends in modelling techniques of Pelton Turbine bucket for increased renewable energy production." Renewable and Sustainable Energy Reviews 112 (2019): 87-101

POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Vodeno kolo [10]</i>	3
<i>Slika 2.2. Postotak proizvodnje hidroelektrične energije po državama 2011.godine [9]</i>	4
<i>Slika 2.3. Najveća hidroelektrana na svijetu [12]</i>	5
<i>Slika 3.1. Lester Allan Pelton [6]</i>	7
<i>Slika 3.2. Slika patenta [6]</i>	7
<i>Slika 3.3. Regulacijski deflektor [7]</i>	9
<i>Slika 3.4. Varijacije Peltonove turbine [7]</i>	10
<i>Slika 3.5. Konstrukcija turbine [7]</i>	11
<i>Slika 4.1. Različiti oblici lopatica [18]</i>	13
<i>Slika 4.2. Turbina velikog promjera sa 20 lopatice [13]</i>	14
<i>Slika 4.3. Simulacija djelovanja fluida na ulazni kut [15]</i>	15
<i>Slika 4.4. Simulacija djelovanja fluida na izlazni kut [14]</i>	16
<i>Slika 4.5. Površina lopatice nakon eksperimenta [8]</i>	18
<i>Slika 5.1. Nacrt turbine tvrtke 3DEXPORT [3]</i>	19
<i>Slika 5.2. Zaslona za učitavanje verzije 2023</i>	21
<i>Slika 5.3. Sketch izrade lopatica</i>	22
<i>Slika 5.4. Revolution oko Y osi</i>	23
<i>Slika 5.5. Izrada druge strane lopatice</i>	24
<i>Slika 5.6. Naredba „shell,</i>	24
<i>Slika 5.7. Izrada tijela lopatice</i>	25
<i>Slika 5.8. „extrusion,</i> tijela lopatice	26
<i>Slika 5.9. Crtanje oblika za prorez vrha lopatice</i>	27
<i>Slika 5.10. Rezanje jednog dijela lopatice</i>	27
<i>Slika 5.11. Rezanje dna uporabom naredbe „mirror,</i>	28
<i>Slika 5.12. Izrada tijela lopatice na drugoj strani lopatice</i>	29
<i>Slika 5.13. Crtanje rotora</i>	30
<i>Slika 5.14. Izrada rotora turbine</i>	31
<i>Slika 5.15 Crtanje lopatica po cijeloj turbini</i>	31
<i>Slika 5.16. Crtanje kružnice radijusa 80mm</i>	32
<i>Slika 5.17. Uvlačenje rotora turbine</i>	33
<i>Slika 5.18. Crtanje kružnice na poledini rotora</i>	34
<i>Slika 5.19. Uvlačenje rotora turbine na poledini rotora</i>	34

<i>Slika 5.20. Crtanje provrta</i>	<i>35</i>
<i>Slika 5.21. Izrada provrta</i>	<i>36</i>
<i>Slika 5.22. Materijal lopatica.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 5.23. Završni izgled turbine.....</i>	<i>37</i>

SAŽETAK

U radu je opisan razvoj Peltonove turbine te njen način rada i njene karakteristike. Rad sadrži opis tehničkih karakteristika i izgleda moderne Peltonove turbine. Također se opisuje utjecaj rotora Peltonove turbine na učinkovitost te su navedena moguća poboljšanja. U radu se pretežno spominju geometrijske karakteristike rotora kao što su broj i oblik lopatica, ali i vanjski utjecaji kao što su trenje i erozija. Kraj završnog rada opisuje postupak izrade geometrije Peltonove turbine. Izrađeni model se sastojao od izrade rotora i izrade lopatica.

Ključne riječi: Peltonova turbina, lopatice, rotor, erozija, učinkovitost

SUMMARY

This paper describes the development of the Pelton turbine and its operating principles. The paper includes the technical specifications and design of a modern Pelton turbine. It also discusses the impact of the Pelton turbine's rotor on efficiency and lists potential improvements. The paper mainly focuses on the geometric characteristics of the rotor, such as the number and shape of the buckets, but also considers external factors such as friction and erosion.

The conclusion of the paper describes the process of creating the geometry of the Pelton turbine. The created model consists of the development of the rotor and buckets, and the entire modeling process is illustrated.

Keywords: Pelton turbine, buckets, rotor, erosion, efficiency