



ROTACIJSKI GENERATOR HIDRODINAMSKKE KAVITACIJE ZA FIBRILACIJO DOLGIH VLAKEN IGLAVCEV

ROTATIONAL CAVITATION GENERATOR FOR THE FIBRILLATION OF CONIFER FIBRES

Janez KOSEL¹, Andrej ŠINKOVEC², Matevž DULAR³

IZVLEČEK

Mletje celuloznih vlaken je počasen in energetsko drag postopek v proizvodnji papirja, vendar je ključno za njegovo kakovostno izdelavo. Zahtevnost tega postopka je še zlasti očitna pri obdelavi dolgih vlaken iglavcev, ki sicer predstavljajo prednostni vir vlaken v industriji in dajejo papirju njegovo jakost in mehansko odpornost. Zato smo v tej študiji testirali nov rotacijski generator za hidrodinamsko kavitacijo za mletje celulozne suspenzije z visokim deležem iglavcev. Glede na naše rezultate smo pokazali, da se v predstavljeni napravi tvorijo intenzivne strižne sile in številna območja razvite kavitacije in da z njenim tretmajem učinkovito povečamo stopnjo mletja celulozne suspenzije. Iz obdelane suspenzije smo proizvedli papir višje kakovosti z večjim nateznim indeksom (50,5 Nm/g) in razpočnim indeksom (3 kPam²/g). Dobljene fizikalne lastnosti so bile zadostne za izdelavo grafičnega papirja in karto- na. Dodatno smo ugotovili, da je laboratorijski rotacijski generator energetsko bolj učinkovit v primerjavi z rutinsko uporabljanimi laboratorijskimi dezintegratorji. Po našem vedenju, je to prvi primer uporabe hidrodinamske kavitacije za mletje celuloze iglavcev s standardno industrijsko koncentracijo.

Ključne besede: Rotacijski generator hidrodinamske kavitacije, hidrodinamska kavitacija, stopnja mletja, natezni indeks, razpočni indeks, celulozna vlakna v papirni industriji

ABSTRACT

The refining of cellulose pulp is important for obtaining high-quality paper. However, refining is slow and costly especially for longer conifer fibres, which give paper its strength and are thus preferred in paper production. In this research/study, we have applied a rotation generator of hydrodynamic cavitation for treating conifer rich pulp samples. Our results show that this device generates intense shear forces and multiple zones of developed cavitation, and is therefore successful in elevating drainability. The paper produced from the refined pulp was of higher quality and had an increased tensile index (50.5 Nm/g) and burst index (3 kPam²/g). This paper was of sufficient quality for printing paper and other types of paperboard quality manufacture. Finally, our rotation generator proved to be economically more efficient than the routinely employed laboratory refiners. According to our knowledge, we are the first to employ hydrodynamic cavitation for the refining of conifer rich pulp of standard industrial consistency.

Keywords: rotational cavitation generator, hydrodynamic cavitation, drainability, tensile index, burst index, papermaking fibres

UVOD

Zaradi tržne konkurence in visokih energetskih stroškov je papirna industrija primorana v iskanje in razvoj okolju prijaznih in energetsko učinkovitih strategij. Proces proizvodnje papirja je sestavljen iz naslednjih korakov: proizvodnja celuloze, mletje, odvodnjavanje s stiskanjem, sušenjem in glajenjem.

Zimzelene iglavci (mehki les), ki se jih zaradi njihovih daljših vlaken preferenčno uporablja v proizvodnji papirja, predstavljajo izziv, saj je treba njihova dolga vlakna mleti z nižjo intenziteto [1]. Posledično je poraba energije veliko večja v primerjavi z obdelavo kratkih vlaken hitro rastočih rastlin. Potemtakem bi lahko izboljšani postopek mehanskega mletja znatno znižal energetske stroške in stroške porabljene vode v proizvodnji papirja na osnovi celuloznih vlaken iglavcev.

Hidrodinamska kavitacija se tvori ob nastanku in rasti parnih mehurčkov in je posledica povečanja hitrosti teka tekočine in hkratnega znižanja statičnega tlaka. Ta

oblika kavitacije se je v primerjavi z ultrazvočno kavitacijo izkazala za bistveno bolj učinkovito v smislu energetske učinkovitosti, širšega področja generiranja kavitacije, enostavne integracije v industrijski kontinuirni sistem ter bistveno nižjih stroškov v opremljenosti [2].

Zato smo v naši raziskavi kavitirali celulozno suspenzijo iglavcev z uporabo novega rotacijskega generatorja hidrodinamske kavitacije (RGHC), opremljenega z rotorjem in nasprotujočim si statorjem, ki imata posebej izoblikovane zobe, na katerih se generirajo agresivni kavitacijski mehurčki.

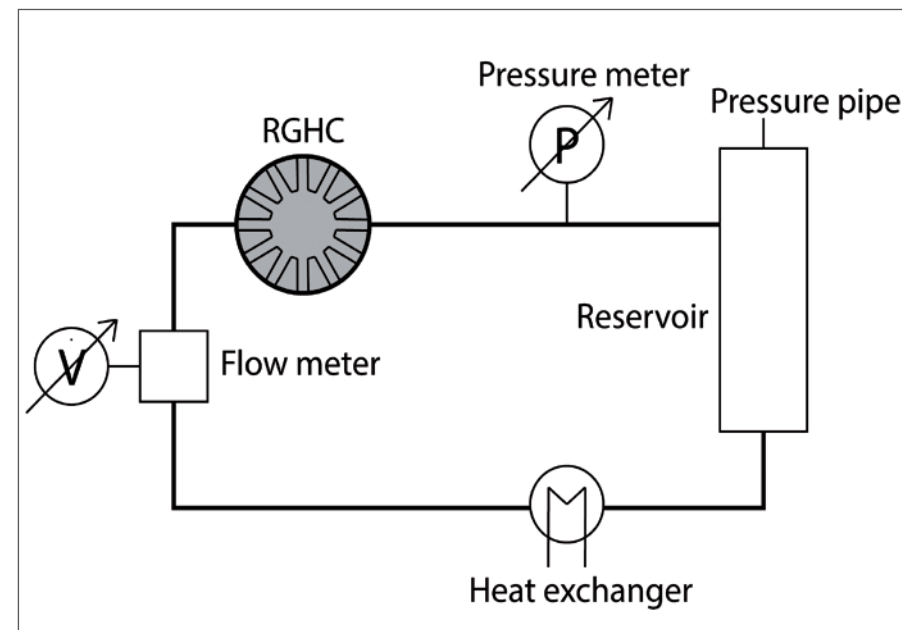
EKSPERIMENTALNI DEL

Pripravili smo mešanice beljenih kratkih celuloznih vlaken evkaliptusa (Santa Fe) in beljenih dolgih sulfatnih vlaken iglavcev (Orion Poels). Za vzorec celuloze za enostavno mletje (VER) smo pripravili 1,57 % celulozno suspenzijo, sestavljeno iz 80 % vlaken evkaliptusa in 20 % vlaken iglavcev. Suspenzija je bila pripravljena v vodi

in je bila predhodno mehansko mleta z uporabo standardnega laboratorijskega mlinca Valley (standard ISO 5264–1). Pred poskusi smo dodali primerno količino vode ali jo ustrezno odstranili skozi filter, da smo pridobili želeno koncentracijo suspenzije (1, 2 ali 3 %). Za pripravo realnega industrijskega vzorca (RIV), ki ga je težje mleti, smo 50 % evkaliptusovih vlaken in 50 % vlaken iglavcev razpustili v vodi do zelene delovne koncentracije (1, 2 ali 3 %).

Stopnjo mletja (°SR) smo določili po ISO 5267–1, testne liste papirja pa smo pripravili po ISO 5269–2. Določili smo naslednje fizikalne lastnosti izdelanih laboratorijskih papirnih listov: natezni indeks (ISO 1924–2), razpočni indeks (ISO 2758), gramaturo (ISO 536), debelino (ISO 534), specifično gostoto (ISO 534) in prepustnost zraka (ISO 5636–3).

Kot alternativo mehanskemu mletju smo razvili nov rotacijski generator hidrodinamske kavitacije (RGHC) [3]. Za naše eksperimente smo RGHC vgradili v modelni vodni sistem, ki je prikazan na sliki 1.

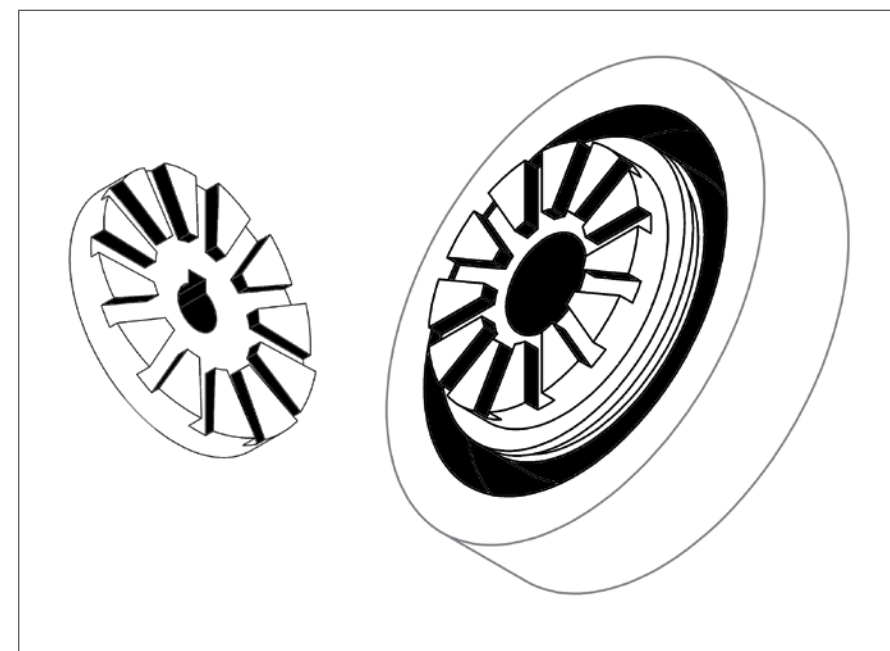


Slika 1. RGHC vgrajen v modelni vodni sistem z merilnimi napravami in z izmenjevalcem toplote
Figure 1: The RGHC device integrated into a model water system equipped with measurement devices and a heat exchanger

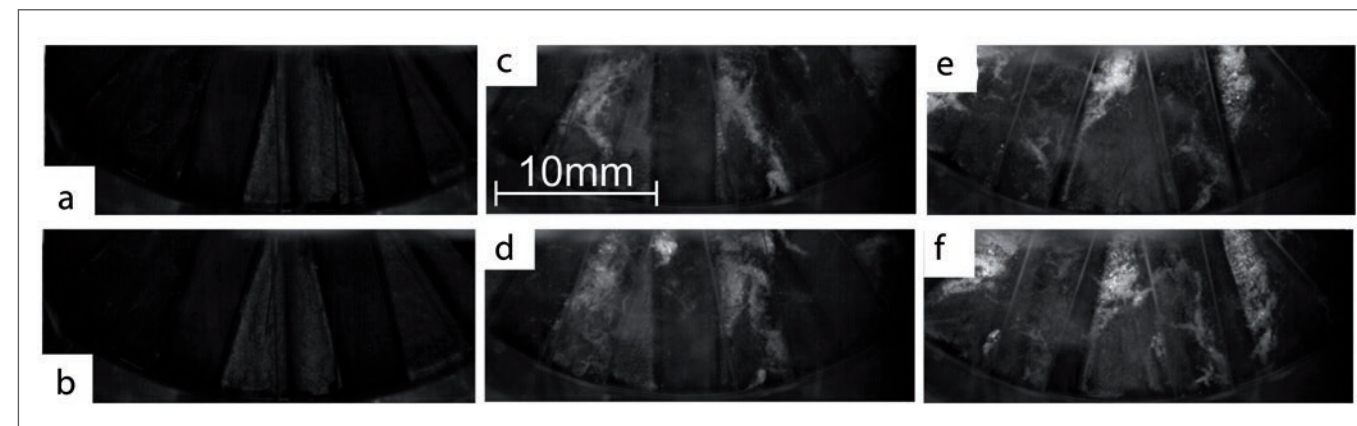
RGHC je zasnovan na osnovi modificirane centrifugalne črpalke, ki v svojem ohišju vsebuje nazobčan rotor in stator (slika 2). Osnovna struktura rotacijskega generatorja še vedno omogoča prečrpavanje tekočine, kar pomeni, da je RGHC enostaven za vgradnjo v kontinuirni industrijski sistem, pri čemer ne potrebujemo nobene dodatne zunanje črpalke. En kavitacijski prehod vzorca smo definirali kot prehod celotnega volumna vzorca celulozne suspenzije (2 L) skozi RGHC.

REZULTATI Z DISKUSIJO

Za vizualizacijo razvoja kavitacije smo RGHC očistili in ga napolnili z vodo ter ga poganjali pri 1000, 5400 in 6000 vrt/min. S snemanjem s hitro kamero (0,2 ms intervali) smo razvito kavitacijo opazili šele pri vrtilnih frekvencah, ki so bile enake ali višje od 5400 vrt/min (slika 3). S teh slik je razvidno, da so se za vsako konico zoba rotorja tvorili kavitacijski



Slika 2: Rotor in stator v RGHC
Figure 2: The rotor and stator of the RGHC device



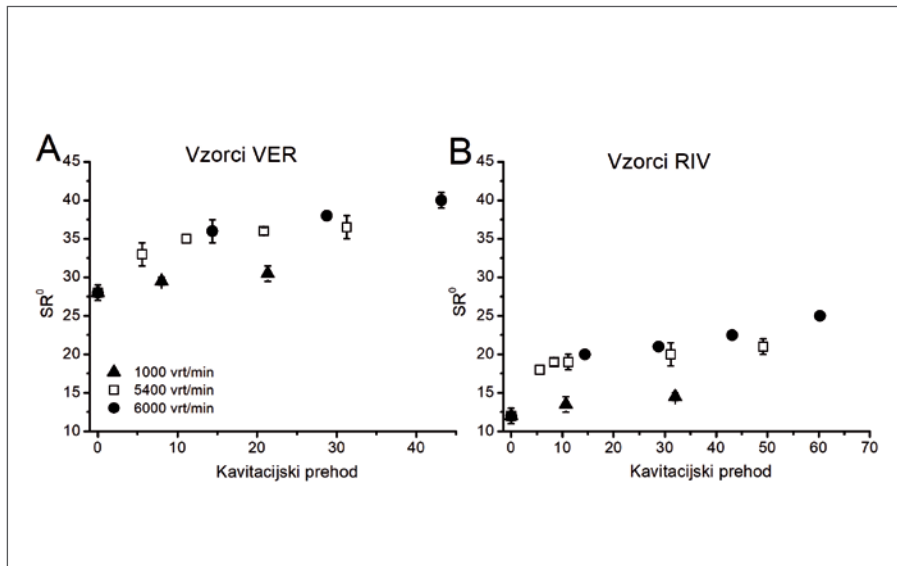
Slika 3. Hidrodinamske značilnosti RGHC in pojav kavitacije pri različnih delovnih pogojih. A–B: pogoji brez razvoja kavitacije; razvita kavitacija pri vrtilni frekvenci 5400 vrt/min (C–D) ali pri 6000 vrt/min (E–F)
Figure 3: Hydrodynamics of the RGHC and the generation of cavitation at different operating conditions: noncavitating conditions (A–B); cavitating conditions at a rotation frequency of 5,400 rpm (C–D) or 6,000 rpm (E–F)



mehurčki, ki so se malo za tem ločili in se porazgubili v okolico.

Naši rezultati (slika 4) so pokazali, da je bil RGHC uspešen pri mletju 1 % celulozne suspenzije, pri čemer so daljši časi kavitiranja vplivali na povečanje stopnje mletja celuloze (večja fibrilacija). S povečanjem vrtilne frekvence (iz 1000 vrt/min na 5400 vrt/min ter iz 5400 vrt/min na 6000 vrt/min) in strižne hitrosti znotraj RGHC smo še dodatno povečali stopnjo mletja obdelane suspenzije. To je veljalo tako za vzorce VER kot tudi za vzorce RIV. Za fibrilacijo in za prekinitev vodikovih vezi med celuloznimi vlakni so najverjetneje odgovorne zelo visoke strižne hitrosti (pri 6000 vrt/min), ki so se tvorile med zobmi rotorja in med tekočino, ki kroži po površini rotorja in statorja [5, 6].

Ko smo pri konstantni vrtilni frekvenci (6000 vrt/min) povečali koncentracijo suspenzije z 2 % na 3 %, se je stopnja mletja povečala (Slika 5). To je veljalo



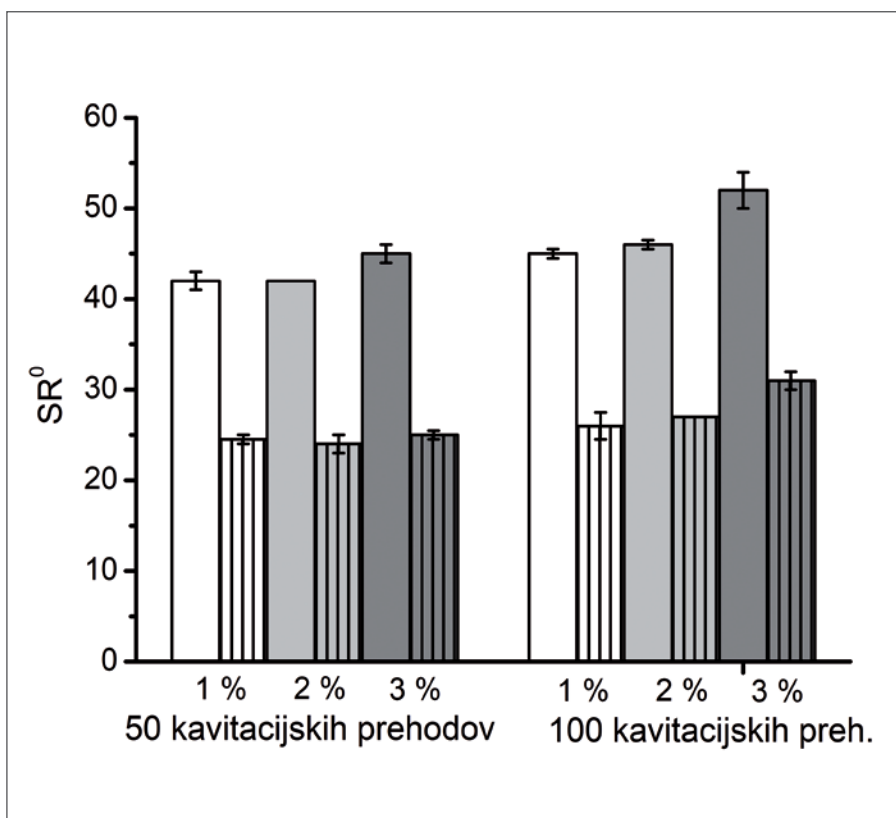
Slika 4: Vpliv treh vrtilnih hitrosti (1000, 5400 in 6000 vrt/min) RGHC-ja na stopnjo mletja vzorcev 1 % suspenzi-
je VER (A) in RIV (B)
Figure 4: The effect of 3 intensity cavitation treatments (1,000 rpm, 5,400 rpm and 6,000 rpm) of the RGHC on
the drainage rate of VER (A) and RIV (B) samples

tako za VER kot tudi za RIV celulozno suspenzijo. To opažanje se ujema z ugotovitvami predhodnih raziskav, ki so dokazale, da je kavitacija naključni pojav, pri čemer velja, da več kot je tarč (vlaknen) na določen volumen, večje bo število kavitiranih tarč (vlaknen) [6].

Čeprav smo na splošno po obdelavi z RGHC za vzorce VER dosegli višje stopnje mletja (52°SR), pa je bila raven mletja, ki smo jo dosegli z RGHC, pri obeh vrstah vzorcev relativno podobna (za 3 % VER se je povečala za 24°SR in za 3 % RIV se je povečala za 20°SR). Lahko rečemo, da je RGHC približno enako učinkovit tudi za rafiniranje vzorcev RIV, ki so težavnejši za fibrilacijo (niso predhodno mleti z laboratorijskim mlinom Valley) in vsebujejo večje količine dolgih vlaknen iglavcev.

Vzorci VER in RIV s 3 % koncentracijo smo najprej kavitirali z vrtilno frekvenco 6000 vrt/min (najučinkovitejša kavitacija za fibrilacijo), nato pa smo iz njih pripravili laboratorijske liste in jim določili naslednje fizikalne lastnosti: natezni indeks, razpočni indeks, gramaturo, debelino in specifični volumen.

Ne glede na vrsto kavitiranega vzorca celulozne suspenzije (VER ali RIV) smo z uporabo RGHC znatno izboljšali najpomembnejše fizikalne lastnosti laboratorijskih listov (natezni in razpočni indeks ter gostoto papirja). Glede na naše rezultate kavitiranja 3 % suspenzije RIV in glede na uveljavljene standarde [7], so bile za proizvodnjo grafičnega papirja ali kartona dosežene zadostne vrednosti nateznega (50,5 Nm/g) in razpočnega indeksa (3 kPam²/g) (Slika 6). Nadalje nam je s kavitiranjem celulozne suspenzije na RGHC uspelo zmanjšati zračno prepustnost papirja, vendar je bila uspešnost tega znatno večja za vzorce VER.



Slika 5: Vpliv koncentracije (1 %, 2 % in 3 %) na stopnjo mletja vzorcev VER (brez črt) in vzorcev RIV (navpične črte) po kavitaciji pri 6000 vrt/min
Figure 5: The effect of pulp sample concentration (1 %, 2 % and 3 %) on the drainage rate of VER (no pattern) and RIV samples (vertical lines) after cavitation treatment at 6,000 rpm

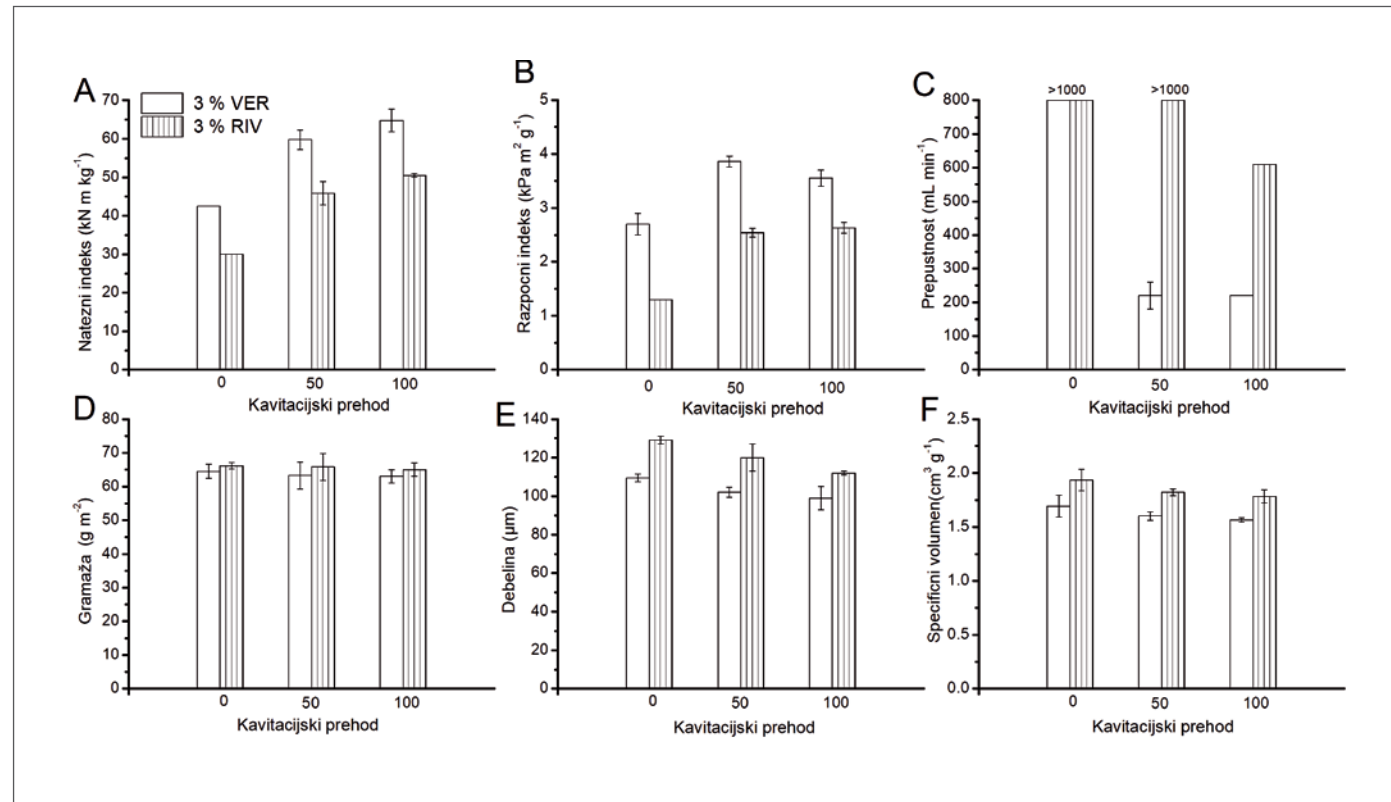
Za konec je naša ekonomska analiza pokazala (Tabela 1), da je za podobno vrsto (mešanica mehkega lesa iglavcev) in koncentracijo okoli 1 %, RGHC porabil polovico manj električne energije v primerjavi s standardnim laboratorijskim mlinom Valley [8].

4. ZAKLJUČEK

V tem delu smo z uporabo RGHC uspešno mleti celulozno suspenzijo iglavcev in listavcev, pri čemer je izdelan

papir dosegal zadostno kakovost za proizvodnjo grafičnega papirja ali kartona. Glede na ekonomsko analizo se je RGHC v primerjavi s standardnim laboratorijskim mlinom Valley izkazal za energetsko učinkovito napravo. Na primer, geometrija zoba rotorja in statorja je zasnovana tako, da tvori ponavljajoče se padce tlaka, kar ima za posledico znatno nižje tlačne izgube [32]. Dodatno RGHC samostojno deluje tudi kot črpalka za prečrpavanje celulozne suspenzije in je posledično neodvisen od morebitnih zunanjih črpanj.

Čeprav smo povečano pilotno različico RGHC že uspešno aplicirali za razgradnjo 1 m³ aktivnega blata iz čistilne naprave [4], pa še ni znano, ali bi bila ta različica uspešna tudi za razvlaknjevanje večjih količin celulozne suspenzije. V skladu s tem se naša ekipa pripravlja na naslednjo fazo eksperimentalnih del,



Slika 6: Fizikalne lastnosti papirnih listov, ki so bili pripravljene iz 3 % vzorca VER in 3 % vzorca RIV po kavitaciji pri 6000 vrt/min
Figure 6: Physical properties of cellulose paper sheets prepared from 3 % VER and 3 % RIV samples after cavitation treatment at 6,000 rpm

Tabela 1: Energetska učinkovitost RGHC v primerjavi s standardnim laboratorijskim mlinom Valley [8]
Table 1: Energy efficiency of the RGHC in comparison to the standardly applied laboratory-scale Valley beater [8]

Naprava	Suspenzija	Koncen-tracija (%)	Čas (h)	Poraba elektrike (kW)	V (m³)	Začetna stopnja mletja (°SR)	Končna stopnja mletja (°SR)	EEO (kWh/m³/ log ₁₀)	Cena (€/m³)
Mlin Valley	Kraft belj. cel. vlakna	1.5*	0.25*	1.030*	0.02*	12*	17*	87.1*	8.7*
RGHC	1:1 iglavci in evkaliptus (beljeni)	1.0	0.10	0.295	0.002	11	25	41.4	4.1
		2.0	0.11	0.297	0.002	11	24	50.8	5.1
		3.0	0.15	0.306	0.002	11	25	58.4	5.8

*Rezultati iz Atic in sod. [8].

ence of hydrodynamic cavitation on intensification of laundry aqueous detergent solution preparation, *Journal of Mechanical Engineering* 63, 2017, 83–92.

[4] PETKOVŠEK, M., MLAKAR, M., LEVSTEK, M., STRAŽAR, M., ŠIROK, B., DULAR, M. A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration, *Ultrasonics Sonochemistry* 26, 2015, 408–414.

[5] PETKOVŠEK, M., ZUPANC, M., DULAR, M., KOSJEK T., HEATH E., KOMPARE B., ŠIROK B. Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment, *Separation and Purification Technology* 118, 2013, 415–423.

[6] BADVE M.P., GOGATE P.R., PANDIT A.B., CSOKA L. Hydrodynamic cavitation as a novel approach for delignification of wheat straw for paper manufacturing, *Ultrasonics Sonochemistry* 21 (2014) 162–168.

[7] CAULFIELD D.F., GUNDERSON D.E. Proceedings of the paper preservation, *Symposium* 66, in: 1988: pp. 31–40.

[8] ATIC C., IMMAMOGLU S., VALCHEV I. Determination of specific beating energy-applied

on certain pulps in a valley beater, *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy* 40, 2005, 199–202.

[9] ZUPANC M., KOSJEK T., PETKOVŠEK M., DULAR M., KOMPARE B., ŠIROK B., BLAŽEKA Ž., HEATH E. Removal of pharmaceuticals from wastewater by biological processes, hydrodynamic cavitation and UV treatment, *Ultrasonics Sonochemistry* 20, 2013, 1104–1112.

[10] FRANKE M., BRAEUTIGAM P., WU Z.-L., REN Y., ONDRUSCHKA B. Enhancement of chloroform degradation by the combination of hydrodynamic and acoustic cavitation, *Ultrasonics Sonochemistry* 18, 2011, 888–894.

¹Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Poljanska cesta 40, 1000 Ljubljana
²Inštitut za celulozo in papir, Bogiščeva ulica 8, 1000 Ljubljana
³Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, Aškerčeva cesta 6, 1000 Ljubljana

Paper
natural
precious
renewable
innovative
essential
Paper is
precious
natural
innovative
essential
natural
renewable
precious
essential
innovative
natural
essential
innovative
precious
renewable
The Values of Paper