



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# VYUŽITÍ KAVITACE V PRŮMYSLOVÝCH PROCESECH

APPLICATION OF CAVITATION IN INDUSTRIAL PROCESSES

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Oliver Hamar

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Oliver Hamar**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Využití kavitace v průmyslových procesech

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kavitace (tj. tvorba syté páry z kapaliny vlivem náhlého poklesu tlaku) představuje velmi perspektivní způsob pro intenzifikaci různých procesů v chemickém, biotechnologickém, farmaceutickém nebo potravinářském průmyslu (míchání, katalýza chem. reakcí, oxidace, extrakce, emulzifikace, desintegrace). Namátkou např. emulzifikace rostlinných olejů, desintegrace vláken celulózy, extrakce lipidů a proteinů z řas, homogenizace mléka, výroba biopaliv, čištění odpadních vod atd.

### Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je zpracovat rešerši využití kavitace v průmyslových procesech obecně a následně speciálně hydrodynamické kavitace, identifikace a kritické posouzení jednotlivých používaných zařízení, zjištění efektivity využití kavitace, případně vytypování dalších oblastí pro aplikaci hydrodynamické kavitace.

### Seznam doporučené literatury:

GOGATE, Parag R. a Aniruddha B. PANDIT. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2005, 12, 21-27.

PANDA, Debabrata a Sivakumar MANICKAM. Cavitation Technology—The Future of Greener Extraction Method: A Review on the Extraction of Natural Products and Process Intensification Mechanism and Perspectives. *Applied Sciences*. Basel: MDPI, 2019, 9, 1-21.

PANDA, Debabrata, Virendra Kumar SAHARAN a Sivakumar MANICKAM. Controlled Hydrodynamic Cavitation: A Review of Recent Advances and Perspectives for Greener Processing. *Processes*. Basel: MDPI, 2020, 8, 1-31.

SUN, Xun, Songying CHEN, Jingting LIU, Shan ZHAO a Joon Yong YOON. Hydrodynamic Cavitation: A Promising Technology for Industrial-Scale Synthesis of Nanomaterials. *Frontiers in Chemistry*. 2020, 8, 1-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

# **ABSTRAKT**

Bakalárska práca sa zaoberá prieskumom aplikačného potenciálu kavitačných technológií v rôznych priemyselných odvetviach. Kavitácia predstavuje vďaka svojim vlastnostiam perspektívny nástroj pre zefektívnenie veľkého množstva priemyselných procesov vo viacerých aspektoch. Prvá časť sa venuje teoretickému popisu kavitačného javu, jeho negatívam a metódam ich detekcie. Druhá časť sa zameriava na rozbor oblastí možného využitia kavitačných technológií a spôsobom generovania kavitácie, s hlavným dôrazom na aktuálne výskumy a zistenia v oblasti uplatnenia hydrodynamickej kavitácie.

## **Kľúčové slová**

Kavitácia, ultrazvuk, hydrodynamická kavitácia, kavitačný reaktor, emulgácia, extrakcia, biopalivá, dezinfekcia, čistenie vody, ekologické spracovávanie

# **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the research of the application potential of cavitation technologies in various industries. Thanks to its properties, cavitation seems to be a promising tool for streamlining a large number of industrial processes in several aspects. The first part deals with the theoretical description of the cavitation phenomenon, its negatives and methods of their detection. The second part focuses on the analysis of possible usage areas of cavitation technologies and the ways of generating the cavitation, focusing on current research and findings in the area of hydrodynamic cavitation application.

## **Key words**

Cavitation, ultrasound, hydrodynamic cavitation, cavitation reactor, emulsification, extraction, biofuel, disinfection, water treatment, green processing

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

HAMAR, Oliver. *Využití kavitace v průmyslových procesech* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132869>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Čestne prehlasujem že som bakalársku prácu vypracoval samostatne s použitím literatúry a zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa: .....

.....

Oliver Hamar

## **POĎAKOVANIE**

Touto cestou by som sa chcel poďakovať pánovi doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, PhD. za vytvorenie skutočne zaujímavej témy bakalárskej práce a jeho trpezlivosť. V neposlednom rade chcem poďakovať svojej rodine za ich podporu počas môjho štúdia.



# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 KAVITÁCIA</b> .....	<b>11</b>
1.1 POPIS KAVITAČNÉHO JAVU .....	11
1.2 TYPY KAVITÁCIE .....	13
1.3 KAVITAČNÉ OPOTREBENIE.....	13
<b>2 TECHNOLOGICKÉ VYUŽITIE KAVITÁCIE</b> .....	<b>16</b>
2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....	16
2.2 TYPY KAVITAČNÝCH REAKTOROV .....	18
2.2.1 SONOCHEMICKÉ REAKTORY .....	18
2.2.2 HYDRODYNAMICKÉ REAKTORY .....	20
2.3 OBLASTI VYUŽITIA KAVITÁCIE .....	22
2.3.1 CHEMICKÝ PRIEMYSEL .....	23
2.3.2 FARMACEUTICKÝ PRIEMYSEL .....	24
2.3.3 ROPNÝ PRIEMYSEL .....	24
2.3.4 POTRAVINÁRSKY PRIEMYSEL.....	25
2.3.5 BIOTECHNOLOGICKÝ PRIEMYSEL .....	26
2.3.6 ČISTENIE A ÚPRAVA VODY .....	28
2.3.7 ČISTENIE PEVNÝCH POVRCHOV .....	29
<b>3 TECHNOLOGICKÉ VYUŽITIE HYDRODYNAMICKEJ KAVITÁCIE</b> .....	<b>30</b>
3.1 HYDRODYNAMICKÁ KAVITÁCIA .....	30
3.2 PERSPEKTÍVNE OBLASTI VYUŽITIA HYDRODYNAMICKEJ KAVITÁCIE .....	31
3.2.1 VÝROBA A HOMOGENIZÁCIA EMULZIÍ .....	31
3.2.2 DESULFURIZÁCIA FOSÍLNÝCH PALÍV [25] .....	32
3.2.3 SYNTÉZA NANOMATERIÁLOV [19].....	33
3.2.4 SYNTÉZA CELULÓZY Z CITRUSOVÉHO ODPADU [34] .....	34
3.2.5 EXTRAKCIA PRÍRODNÝCH PRODUKTOV .....	34
3.2.6 VÝROBA BIOPALÍV .....	36
3.2.7 SPRACOVANIE POTRAVÍN .....	37
3.2.8 ČISTENIE VODY .....	40
<b>ZÁVER</b> .....	<b>46</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b> .....	<b>48</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK</b> .....	<b>53</b>

## ÚVOD

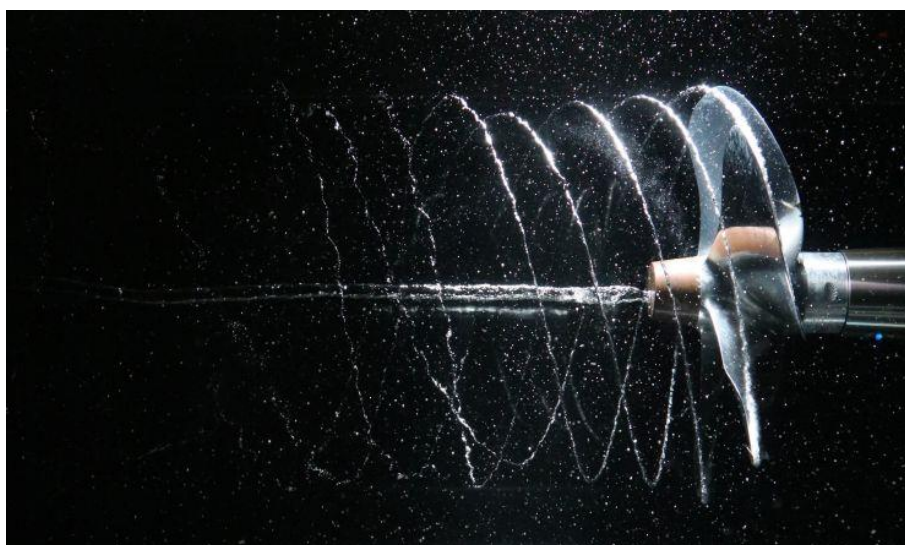
Kvůli svým destrukčním účinkům představuje kavitácia v technickej praxi problém už dlhé desaťročia. Inžinieri sa preto už dlho snažia redukovať tieto negatívne účinky návrhom čo najoptimálnejších tvarov hydraulických zariadení (čepradlá, vodné turbíny, armatúry,...) alebo vývojom materiálov odolnejších voči kavitačnej erózii. Hoci aj v dnešnej dobe je kavitácia všeobecne vnímaná ako negatívny jav, dostáva sa, najmä v posledných rokoch, čoraz viac pozornosti možnostiam jej využitia v priemyselných procesoch, ale taktiež aj v iných oblastiach.

Pozornosť tejto práce sa zameriava predovšetkým na pozitívnu stránku kavitácie, a teda možnostiam jej priemyselného využitia. Najstaršie kavitačné technológie boli postavené na účinkoch akustickej kavitácie (ultrazvuku), ktorých rozsah využitia je skutočne široký, problémy však nastávajú pri ich aplikovaní v procesoch priemyselných rozmerov. Na druhej strane, technológie založené na použití hydrodynamickej kavitácie, ktorým sa začalo dostávať zvýšenej pozornosti iba v nedávnych rokoch, by vďaka svojim vlastnostiam mohli predstavovať zlomový bod pre účel úspešného prekonávania pomyselných hraníc laboratórneho a veľkokapacitného (priemyselného) uplatnenia. Kavitačné technológie všeobecne predstavujú skutočne pôsobivú alternatívu voči konvenčným technológiám uplatňovaným v priemyselných procesoch ako sú napr. syntéza materiálov, výroba a homogenizácia emulzií, extrakčné procesy, výroba biopalív, dezinfekcia a homogenizácia potravín, čistenie vôd atď. Popisu využitia hlavných typov kavitácie, spôsobom ich generovania pomocou zariadení známych ako kavitačné reaktory a oblastiam ich využitia je venovaný priestor v druhej kapitole. Nasledujúca kapitola sa potom venuje detailnejšej charakteristike javu hydrodynamickej kavitácie. Pozornosť je venovaná predovšetkým najnovším výskumom a zisteniam vo vybraných aplikačných oblastiach.

Cieľom práce bolo spracovať čo najširší ucelený prehľad aktuálneho poznania spojeného s využitím kavitácie, posúdiť jej účinnosť v porovnaní s konvenčnými technológiami a zvážiť riziká a výzvy spojené s rozširovaním využívania kavitačných technológií.

# 1 KAVITÁCIA

História výskumu kavitácie siaha do konca 19. storočia. Ako prvý ju popísal v roku 1895 S. W. Barnaby. Jedná sa o fyzikálny jav, ku ktorému dochádza pri obtekaní pevných telies kvapalinou pri určitej teplote a tlaku. Pojem kavitácia sa v technickej praxi skloňuje najmä s problémami ktoré spôsobuje. V minulosti bol tento fenomén pozorovaný najmä pri prevádzke lodných skrutiek, spôsobujúc viditeľné opotrebenie obtekaných súčastí (kavitačná erózia (viac v kapitole 1.3)), pokles predpokladaného výkonu a tým aj účinnosti lodných pohonov. Takýto pokles účinnosti je spojený s tým, že kavitácia skresľuje vzor prúdenia okolo obtekaných telies a tým narušuje jeho plynulosť. Medzi ďalšie nežiaduce vlastnosti tohto javu patrí zvýšená hlučnosť, o ktorej pôvode pojednáva bližšie kapitola 1.1. [1], [2].



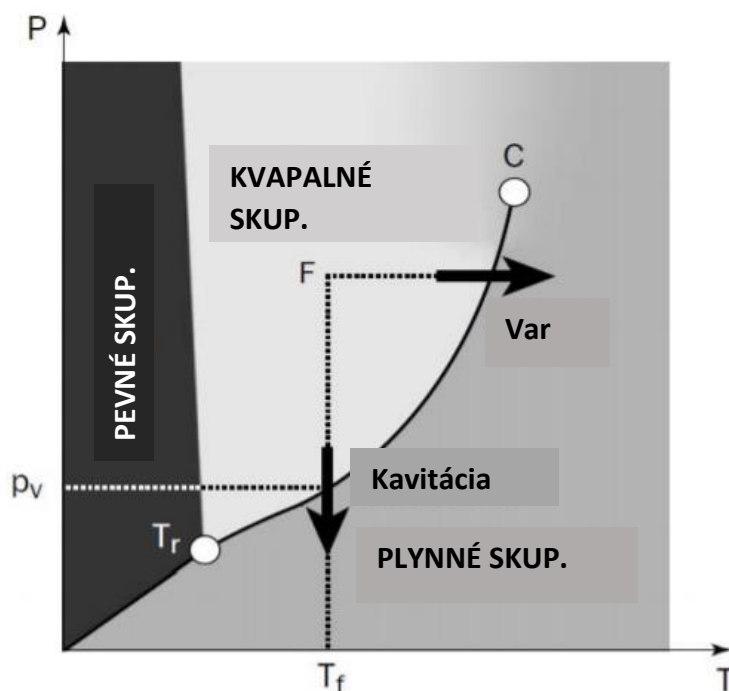
*Obr.1 Kavitácia vzniknutá na lopatkách lodnej skrutky [3]*

## 1.1 POPIS KAVITAČNÉHO JAVU

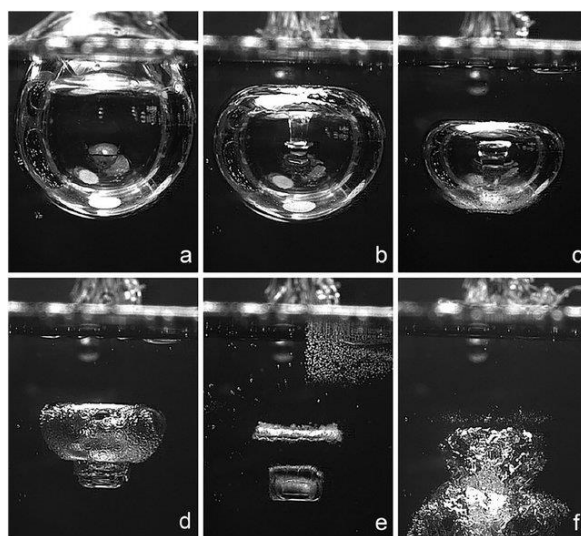
Kavitácia predstavuje jav v kvapaline, vyznačujúci sa vznikom, vývojom a zánikom kavitačných dutín, známych aj ako kavitačných bublín. K takémuto narušeniu spojitosti kvapaliny dochádza za dosiahnutia špecifických fyzikálnych podmienok.

Keď pri danej teplote poklesne tlak v kvapaline na tzv. kavitačný tlak (tlak sýtych pár), dôjde k vypareniu kvapaliny a tvorbe spomínaných bublín. Tento jav je znázornený vo fázovom diagrame na obrázku č.2. Pri ďalšom znižovaní tlaku dochádza k nárastu objemu bublín. Vplyvom prúdenia kvapaliny sa takéto bubliny dostávajú do kontaktu s oblasťami o vyššom tlaku než je tlak kavitačný, pri čom dochádza k ich okamžitému kolapsu. Pri tomto jave vzniká aj spomínaný kavitačný hluk [1].

Náhly nárast a kolaps kavitačných bublín sprevádza vznik trysiek kvapaliny (microjets) o veľmi vysokom tlaku, pri čom dochádza k narúšanju (erózii) povrchu obtekaného telesa vystaveného kavitujúcej kvapaline [2]. Priebeh zániku kavitačných bublín je znázornený na obrázku č.3.



*Obr.2 Fázový diagram vody [4]*



*Obr.3 Zánik kavitačnej bubliny a tvorba trysky(microjet) [5]*

Kavitačné bubliny vznikajú v miestach s porušenou súdržnosťou kvapaliny, pri čom sa usudzuje, že najväčší vplyv na znižovanie pevnosti kvapaliny, a tým zároveň aj narúšanie jej súdržnosti, majú voľné nerozpustené plyny, ktoré tvoria útvary známe ako kavitačné jadrá. Kavitačné bubliny vznikajú práve z týchto jadier. Pri určitých podmienkach v kvapaline dosahujú kavitačné jadrá kritickej veľkosti, začínajú rásť, až sa stávajú viditeľné voľným okom ako kavitačné bubliny [1].

Existencia takýchto bublín ovplyvňuje fyzikálne vlastnosti kvapaliny. Napr. na počte bublín je závislá jej hustota. Dochádza však k zmenám aj ďalších parametrov, napr. so zánikom bublín spojený prudký vývin tepla, ovplyvňujúci termodynamické vlastnosti kvapaliny [6].

## 1.2 TYPY KAVITÁCIE

Zhluk kavitačných bublín vytvára tzv. kavitačnú oblasť. Podľa úrovne vyvinutia a chovania tejto oblasti rozoznávame nasledovné typy kavitácie [1]:

- *Čiastočne vyvinutá kavitácia* - je vo fáze vývoja medzi počiatkom kavitácie a vyvinutou kavitáciou
- *Úplne vyvinutá kavitácia* - kavitačná oblasť ovplyvňuje prúdové pomery v hydraulických zariadeniach do takej miery, že má vplyv na aj na energetické parametre, ako prietok alebo účinnosť
- *Superkavitácia* - jej kavitačná oblasť neustále rastie, uzatvára sa až za obtekaným telesom

Keď sa v kvapaline v nasýtenom stave zníži tlak, dochádza k jej nasýteniu plynom. Tento plyn sa vyparuje a vstupuje do bubliny. K rozhraniu bubliny sa uvoľnený vzduch dostáva z okolia kvapaliny difúziou. Tento proces vývoja bubliny je pomalý a nazýva sa *plynová kavitácia* [1].

**Hydrodynamická kavitácia** je dôsledkom dynamického poklesu tlaku pri prietoku alebo obtekaní v rôznych hydraulických strojoch, napr. v čerpadlách alebo vodných turbínach [1].

**Akustická kavitácia** vzniká dôsledkom vysokofrekvenčných tlakových vln vyvolaných kmitaním telesa ponoreného v kvapaline, ktoré rozkmitajú kvapalinu, a zmenou ich amplitúdy dochádza k vzniku a zániku kavitačných bublín [1].

## 1.3 KAVITAČNÉ OPOTREBENIE

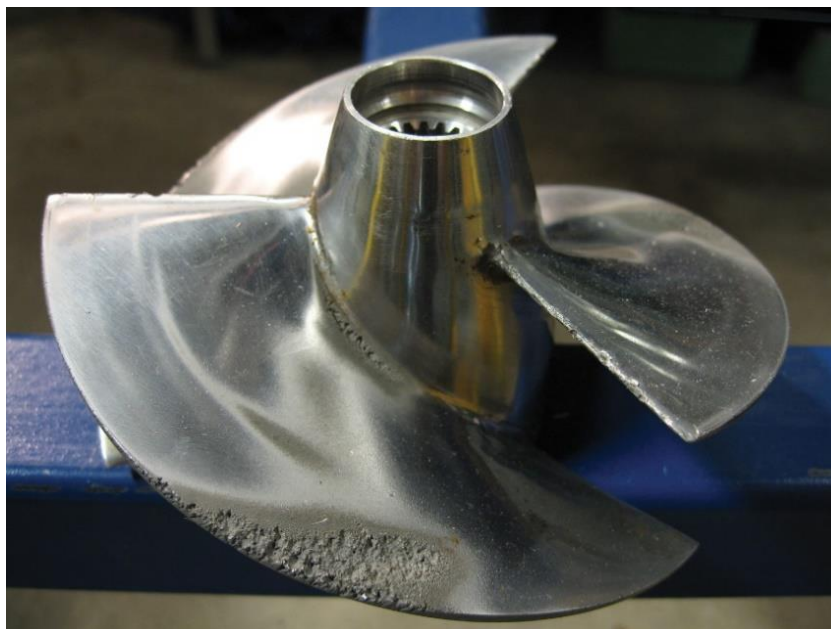
Povrch materiálu vystaveného kavitačnému pôsobeniu v závislosti na dobe vystavenia tomuto pôsobeniu najskôr zdrsnie, a následne sa v ňom tvoria ostro ohraničené jamky. Častice materiálu sa oddeľujú a sú odplavované prúdom. Tento proces je známy ako kavitačná erózia. Na obrázku č. 4 je možné vidieť lodnú skrutku vystavenú účinkom kavitácie. K najväčšej erózii dochádza na konci kavitačnej oblasti v smere prúdenia, v miestach kde sa tlak zvyšuje nad hodnotu kavitačného tlaku. Kavitácia pôsobí deštruktívne na všetky druhy materiálov, avšak intenzita tohto pôsobenia sa s ohľadom na konkrétny materiál môže líšiť [1].

Pri erózii vznikajú mikrotrhliny a šíria sa až do momentu, keď materiál nemôže ďalej odolávať záťaži spôsobenej kolabujúcimi kavitačnými bublinami. Ako to bežne býva, mikrotrhliny sa tvoria primárne v koncentrátoroch napätia, napr. v zárezoch, ostrých hranách alebo v nehomogénnych oblastiach materiálu. To znamená, že drsný povrch je na kavitačné opotrebenie náchylnejší, a keďže tvorba jamiek a drsného povrchu sú pre kavitačnú eróziu charakteristické, intenzita poškodzovania materiálu sa časom zvyšuje [7].

Formy kavitačného pôsobenia na materiál však nepredstavujú iba vplyvy mechanické, ktoré sú spôsobené hydraulickými rázmi pri zániku kavitačných bublín. Medzi ďalšie faktory ovplyvňujúce kavitačné opotrebenie patria aj napr. chemické vplyvy, dané kavitáciou vyvolanou chemickou interakciou medzi materiálom steny a kvapalinou, alebo pôsobením chemicky aktívneho obsahu zanikajúcej kavitačnej bubliny. Avšak pri uvažovaní týchto vplyvov v porovnaní s pôsobením ostatných, je ich vplyv nepatrný [1].

Elektrochemické vplyvy predstavujú, naopak, nezanedbateľnú časť celkových účinkov kavitácie, najmä u materiálov málo odolných voči korózii [1].

Ohrievaním povrchovej vrstvy napadnutej plochy energiou kavitačných rázov a v istej miere aj kontaktom s ohriatym obsahom kavitačnej bubliny vznikajú tepelné účinky. Nerovnomerným ohrevom povrchu dochádza k vzniku tepelných napätí, ktoré zvyšujú mechanický účinok kavitácie [1].



**Obr.4** Kavitačné opotrebenie na lodnej skrutke [2]

Na zlepšovanie odolnosti materiálov voči kavitačnému opotrebeniu sa v súčasnej dobe najčastejšie používajú viaceré druhy ochranných povlakov, ako napr. pri obrábacích nástrojoch. Jedná sa o napr. vystužené epoxidové nátery, polyuretánové nátery alebo rôzne keramické povlaky. Ochranné povlaky sa vyberajú s ohľadom, aby pri daných operačných podmienkach hydraulických zariadení zabezpečili predĺženie ich životnosti a minimalizovali prevádzkové náklady. V porovnaní so staršími metódami tvorby ochranných povlakov, majú epoxidové a polyuretánové nátery okrem znížených nákladov výhodu aj v tom, že pomáhajú znižovať zvyškové tepelné napätia vyvolané kavitáciou, ich nanášanie na povrch je jednoduchšie a nevyžaduje vysokú zručnosť obsluhujúceho personálu [8].

Účinky kavitačnej erózie vyvolávajú potrebu pravidelnej výmeny dielov, alebo obnovy ochranných povlakov. Pre odhadnutie ich životnosti sa vplyv kavitačných účinkov na konkrétne povrchy testuje. Medzi najznámejšie metódy testovania kavitačnej erózie patrí testovanie s využitím vibračnej/ultrazvukovej kavitácie, ktorá vystavuje testovaný povrch kontrolovaným, intenzívnym, opakujúcim sa napät'ovým cyklom, spôsobujúcich významné opotrebenie za krátky čas [9]. Ďalej sa jedná o testovanie kavitačným prúdom, vytvárajúcim mraky kavitačných bublín, ktoré zanikajú na povrchu testovaného vzorku [10]. Zariadenie známe ako kavitačný tunel, ktorý je možné vidieť na obrázku č.5, sa využíva najmä pre testovanie vplyvu kavitačných účinkov na pohonné zariadenia, ako sú napr. skrutky lodí, ponoriek, alebo torpéd. Tunel simuluje prostredie prevádzky takýchto pohonov [11].



***Obr.5** Kavitačný tunel od firmy Kempf & Remmers [11]*

## 2 TECHNOLOGICKÉ VYUŽITIE KAVITÁCIE

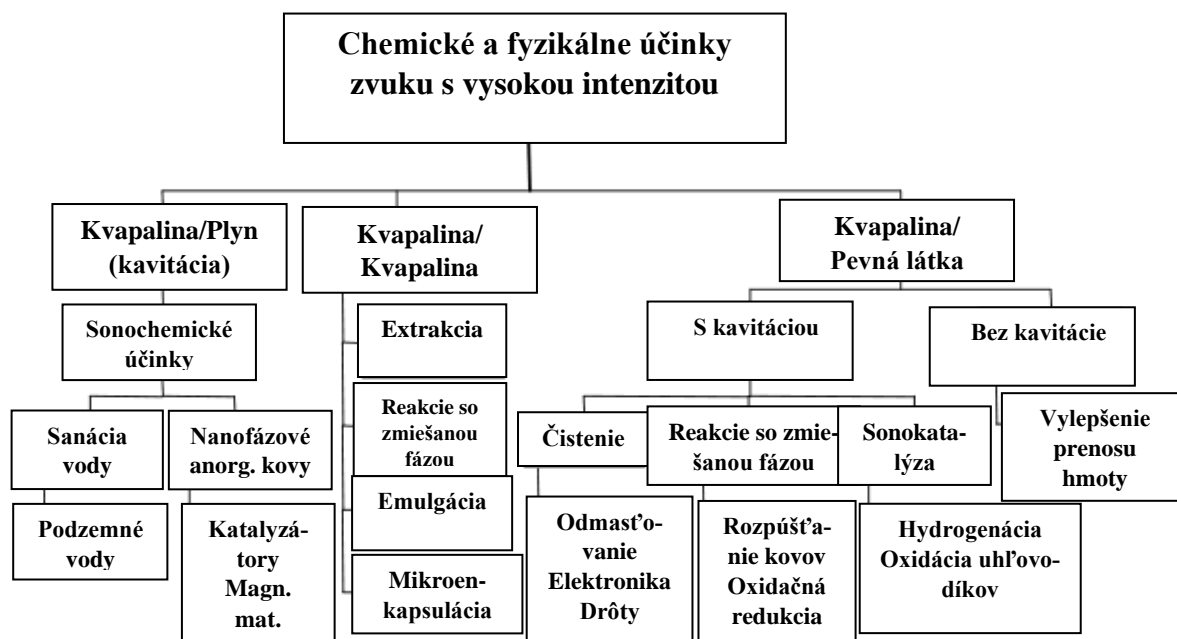
Okrem spomínaných negatív nachádza veľké množstvo energie obsiahnutej v kavitačných bublinách, ako už bolo prízvukované, čoraz širší aplikačný potenciál. Ten už nejaký čas presahuje hranice priemyselného využitia, a nachádza využitie aj v iných oblastiach, napr. v medicíne či kozmetike. Táto kapitola sa venuje predstaveniu hlavných spôsobov generovania a technologického využitia kavitácie.

### 2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Kavitácia vyvolaná v zariadeniach označovaných ako kavitačné reaktory, vytvára v požadovaných oblastiach podmienky s vysokými teplotami a tlakmi. Na udržiavanie kavitačných bublín v presne požadovaných oblastiach sa využíva napr. magnetické pole, vytvárané v reaktoroch [12]. Vysoké teploty a tlaky v kombinácii s rapídny m ochladzovaním vytvárajú prostredie pre priebeh fyzikálnych a chemických procesov pri extrémnych podmienkach [13], [14]. Medzi rôznymi metódami generovania kavitácie sa najvyššej pozornosti a záujmu, z hľadiska priemyselného ako aj akademického, dostáva najmä generovanie kavitácie akustickej a hydrodynamickej. Dôvodom je ľahká obsluha zariadení a dosahovanie požadovaných intenzít kavitácie, vhodných pre viaceré fyzikálne a chemické transformácie [15].

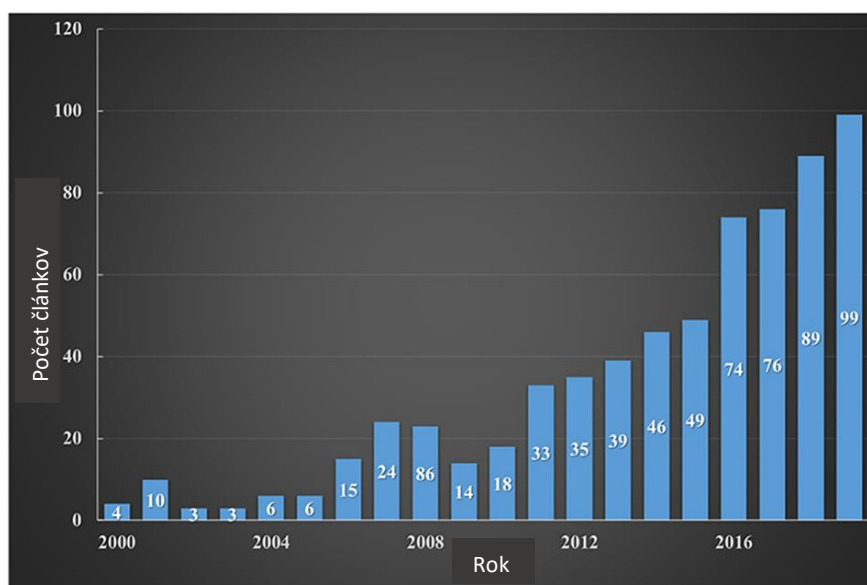
Výskumu využitia akustickej kavitácie sa vedci venujú už niekoľko desaťročí. Ako sa spomína v kapitole 1.2, vzniká dôsledkom zvukových vln generovaných v kvapaline. Zvyčajne sa jedná o ultrazvukové vlny, o frekvencii 16 kHz až 100 MHz. Takáto zvukom indukovaná kavitácia vyvoláva v kvapaline chemické zmeny, označované ako sonochemické. Sonochemické javy sú často sprevádzané svetelnou emisiou (sonoluminiscenciou). Zvukové vlny o vysokých frekvenciách majú chemické a fyzikálne účinky nachádzajúce široké využitie, ako je možné vidieť na obrázku č.6. V rozpore s logickým očakávaním, sa napriek dlhotrvajúcemu výskumu a sľubným účinkom táto metóda pri procesoch v priemyselnom meradle využíva málo. Dôvodom sú chýbajúce znalosti v požadovaných oblastiach, ako sú materiálové vedy, akustika, alebo chemické inžinierstvo, potrebných pre zväčšenie týchto procesov do priemyselných rozmerov. Významnú rolu predstavuje aj nerentabilnosť. Z týchto dôvodov je uplatnenie účinkov akustickej kavitácie limitujúce, hodiace sa skôr pre laboratórne procesy [14], [16].





**Obr.6** Klasifikácia chemických a fyzikálnych účinkov ultrazvuku [14]

Pre aplikácie v procesoch väčších meradiel sa teda čoraz viac pozornosti dostáva kavitácii hydrodynamickej. V roku 1994 bola zverejnená štúdia [17], v ktorej boli prvýkrát popísané priaznivé vplyvy hydrodynamickej kavitácie na dezintegráciu buniek mikroorganizmov. Ako je možné si všimnúť na obrázku č.7, následne sa výskumu v oblasti využitia hydrodynamickej kavitácie začalo venovať viac a viac pozornosti, pri čom najviac článkov na toto téma bolo zverejnených iba v nedávnych rokoch. V porovnaní s akustickou kavitáciou má výhodu hlavne v tom, že je možné ju generovať vo väčších meradlách, čím sa oveľa viac hodí pre uplatnenie v procesoch priemyselných rozmerov. Predstavuje aj omnoho účinnejšiu alternatívu z hľadiska energetického. Z hľadiska prenosu energie je hydrodynamická kavitácia v porovnaní s akustickou až 40-krát účinnejšia [16], [18].



**Obr.7** Počet publikovaných článkov o využití hydrodynamickej kavitácie od roku 2000 do 2019 [19]

## 2.2 TYPY KAVITAČNÝCH REAKTOROV

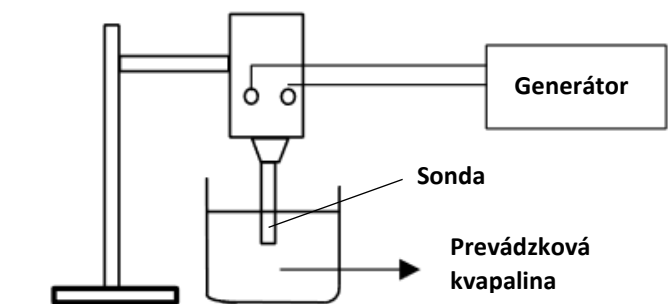
Kavitačné reaktory sú zariadenia, v ktorých sa generuje kavitácia pre potreby technického využitia. Podľa spôsobu generovania kavitácie rozlišujeme dve základné typy. Reaktory sonochemické (akustická k.) a hydrodynamické (hydrodynamická k.) [13].

### 2.2.1 SONOCHEMICKÉ REAKTORY

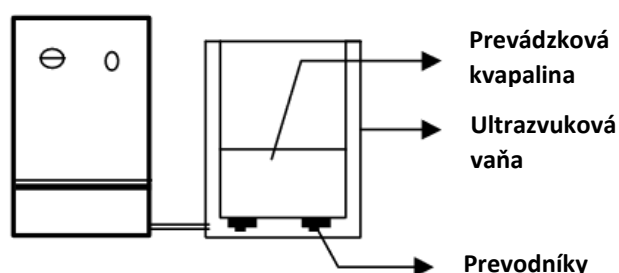
Sonochemických reaktorov existuje viacero druhov. Ultrazvukové vlny sú generované pomocou tzv. prevodníkov (transducers). Medzi najpoužívanejšie dizajny sa zaraďujú **ultrazvukové sondy** (ultrasonic horns/probes), schematicky znázornené na obrázku č.8. Sonda ponorená v prevádzkovej kvapaline pracuje ako prevodník energie. Kavitačné účinky takýchto zariadení však nemajú veľký dosah, a je možné ich pozorovať len v blízkosti vibrujúceho povrchu. S rastúcou vzdialenosťou od sondy sa intenzita týchto účinkov exponenciálne znižuje, a zaniká už vo vzdialenosti 2-5 cm od jej povrchu. V porovnaní so systémami založenými na viacerých prevodníkoch, majú ultrazvukové sondy slabú účinnosť, keďže nevedia prevádzať akustickú energiu cez veľké objemy prevádzkovej kvapaliny. Povrch sondy je náchylný na eróziu, oddeľovanie častíc a zlyhanie v dôsledku únavy materiálu [13]. Avšak, ich veľkou výhodou je schopnosť generovať kavitáciu o vysokej intenzite, ktorú je možné sústrediť na požadované miesto spracovávaného materiálu. Kapacita týchto reaktorov je obecné od 10 do 200 ml. Nachádzajú uplatnenie hlavne v laboratórnom experimentoch [15]. Využitie nachádzajú aj pri generovaní kavitácie v extrakčných a emulgačných procesoch [20].

Medzi reaktory pracujúce s viacerými prevodníkmi energie patria **ultrazvukové vane** (ultrasonic baths) a viacfrekvenčné **prietokové články** (flow cells). Použitie viacero prevodníkov vedie k nižším prevádzkovým intenzitám pri porovnateľných hodnotách rozptylu energie. To redukuje problémy s blokovaním kavitácie, eróziou a oddeľovaním častíc na aktívnom povrchu. Poloha prevodníkov sa môže meniť, pre dosiahnutie priestorovo rovnomerného akustického obrazca v celom objeme reaktora [13]. Klasický typ ultrazvukovej vane využíva sadu troch prevodníkov na spodku reaktora v trojuholníkovom usporiadaní. Schematicky je tento druh reaktora znázornený na obrázku č. 9. Objemová kapacita takýchto reaktorov je zvyčajne do 3 l, avšak pri určitých modifikáciách je možné tento objem navýšiť. Majú podobné využitie ako ultrazvukové sondy [15].

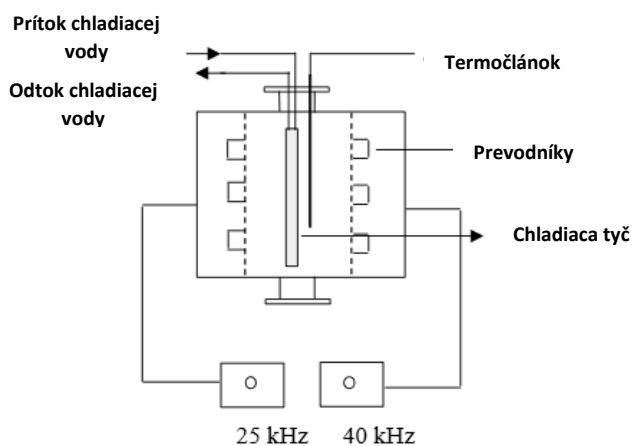
Dvojfrekvenčný prietokový článok je tvorený obdĺžnikovou nádobou s dvomi sadami prevodníkov (po tri v každej sade) osadených na dvoch protiahlých plochách. Operačný priestor takýchto článkov má objem do 1,5 l. Prevodníky pracujú nezávisle alebo súčasne na rozdielnych frekvenciách, pri čom všetky sady si zachovávajú jednotný výkon. Schematické zobrazenie sa nachádza na obrázku č. 10. Hexagonálne trojfrekvenčné prietokové články majú väčšiu kapacitu (do 7,5 l). Prevodníky majú rovnaké usporiadanie (po tri na každej stene článku), pri rovnakých výkonoch na každej stene. Väčší počet stien umožňuje vyšší rozptyl energie, ako pri dvojfrekvenčných článkoch. Dve protiahlé steny článku pracujú na podobných/rovnakých frekvenciách, čo znamená, že prevodníky pracujú dokopy na troch rôznych frekvenciách. Schematické zobrazenie hexagonálneho prietokového článku sa nachádza na obrázku č. 11. Prietokové články môžu byť prevádzkované v dávkovom, alebo pri prácach väčšieho rozsahu, v kontinuálnom režime [15]. Využitie nachádzajú napr. pri procesoch čistenia odpadných vôd [16].



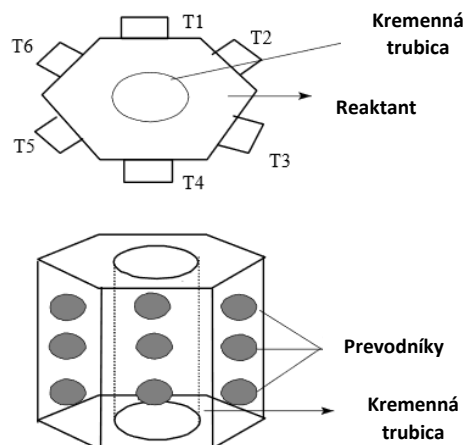
**Obr.8** Schematické znázornenie ultrazvukovej sondy [15]



**Obr.9** Schematické znázornenie ultrazvukovej vane [15]



**Obr.10** Schematické znázornenie dvojfrekvenčného prietokového článku [15]



**Obr.11** Schematické znázornenie trojfrekvenčného hexagonálneho prietokového článku [15]

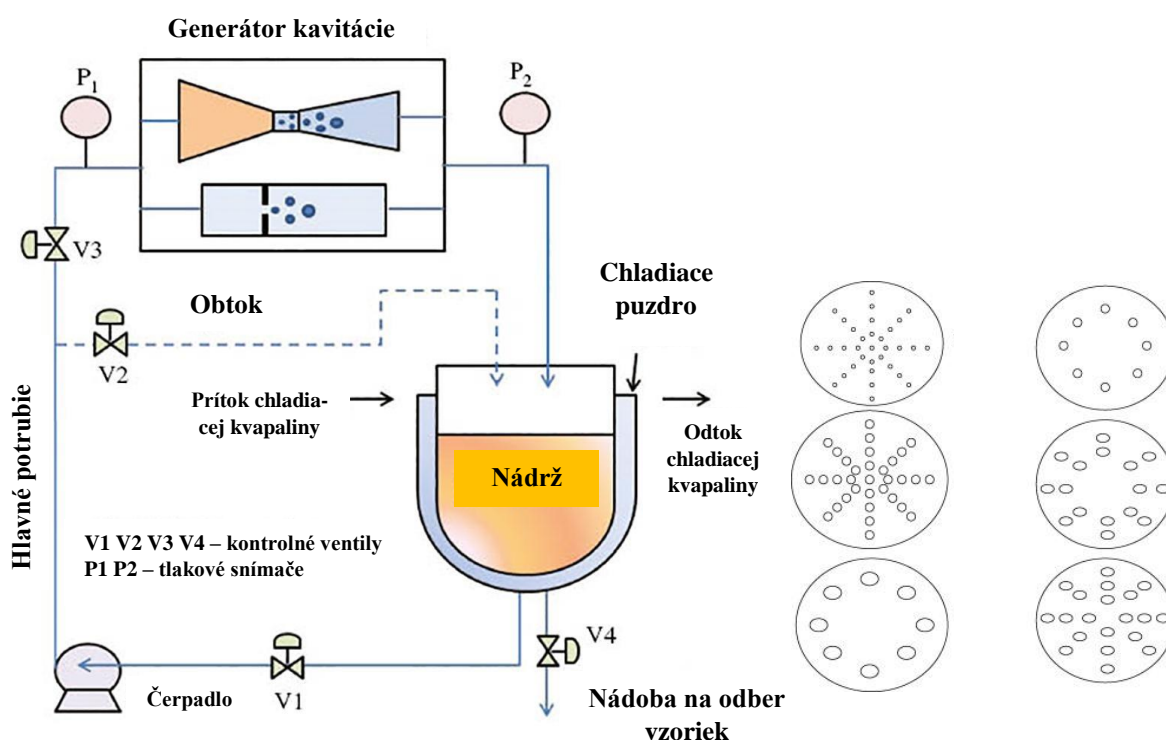
Aj napriek veľkému pokroku vývoja technológií spojených s využitím hydrodynamickej kavitácie môžu byť sonochemické reaktory v niektorých procesoch stále platné, a do budúcnosti sa s nimi počíta. Potenciál využitia majú predovšetkým v procesoch homogenizácie a tvorby emulzií, alebo extrakčných procesoch. Perspektívnou oblasťou sa javí návrh nových reaktorov s viacerými multifrekvenčnými prevodníkmi [13].

## 2.2.2 HYDRODYNAMICKÉ REAKTORY

Hydrodynamické kavitáčné reaktory (Hydrodynamic cavitation reactors HCR) sú vhodné najmä tam, kde kapacity sonochemických už nie sú postačujúce. Na základe princípov hydrodynamickkej kavitácie popísaných v kapitole 3.1, je možné ovládaním prevádzkových a geometrických podmienok reaktora dosiahnuť pre požadovaný proces potrebnú intenzitu kavitácie pri maximálnej energetickej účinnosti. Vysoká variabilita týchto reaktorov umožňuje široké spektrum využitia účinkov hydrodynamickkej kavitácie [13].

Medzi bežne používané zariadenia pracujúce s hydrodynamickou kavitáciou patrí vysokotlakový homogenizátor. Tento typ reaktora sa zvyčajne skladá z napájacej nádrže a dvoch škrtiacich ventilov, kontrolujúcich tlak v reaktore. Všeobecne sa hodia napr. pre emulgačné procesy v potravinárskom, farmaceutickom a biotechnologickom priemysle. Ale využitie nájdu mnohých ďalších oblastiach [13].

Na obrázku č.12 je možné vidieť schematické usporiadanie reaktora založeného na použití **clonových dosiek**. Zúženie môže byť tvorené jedným alebo viacerými otvormi (rôznych tvarov) v clone, prípadne aj **Venturiho trubicou**. Použitie clonových dosiek s viacerými otvormi, príklady ktorých je možné si všimnúť na obrázku č.13, umožňuje dosiahnutie rôznych intenzít kavitácie. Usporiadanie clony teda ponúka veľkú flexibilitu z hľadiska prevádzkových a geometrických podmienok [13].

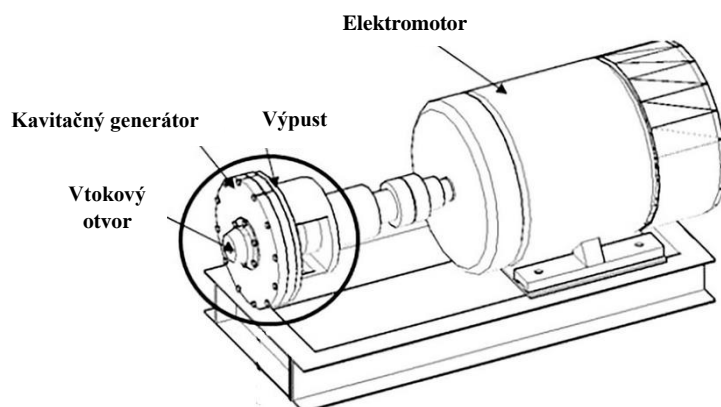


*Obr.12 Schéma tradičného hydrodynamického reaktora [21]*

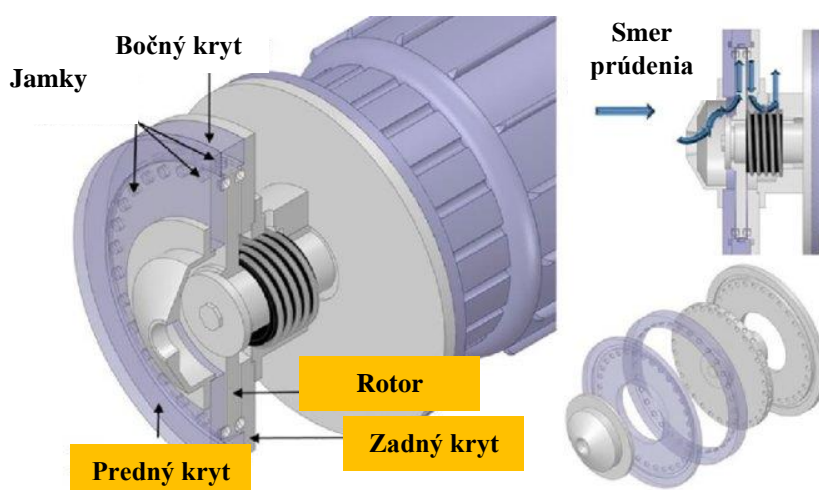
*Obr.13 Typy clonových dosiek s rozličným počtom, priemerom a usporiadaním dier [13]*

Kavitáciu je taktiež možné tvoriť aj pomocou rotačných zariadení. V nedávnej dobe bol predstavený inovatívny **rotor-statorový** typ hydrodynamického kavitáčného reaktora [19]. Ten využíva na vytvorenie kavitácie vysokorýchlostný rotačný kruhový disk/valec na ktorom sa

nachádzajú jamky, poháňaný elektromotorom. Rotor poháňa kvapalinu, ktorej smer je vďaka viskozite totožný so smerom otáčania. Pri prietoku spomínanými nerovnosťami sa v kvapaline vytvárajú separované oblasti s nízkym tlakom. Po dosiahnutí kritickej rýchlosti dochádza v kvapaline k tvorbe kavitačných bublín. V pokročilých typoch týchto reaktorov (advanced rotational hydrodynamic cavitation reactors ARHCR) sú okrem disku jamky vytvorené aj na čelnom, bočnom a zadnom kryte, pričom pre zamedzenie rezonancie sa ich počty na každej súčasti musia líšiť. Na nasledujúcom obrázku je možné vidieť schematické zobrazenie tohto typu [22].

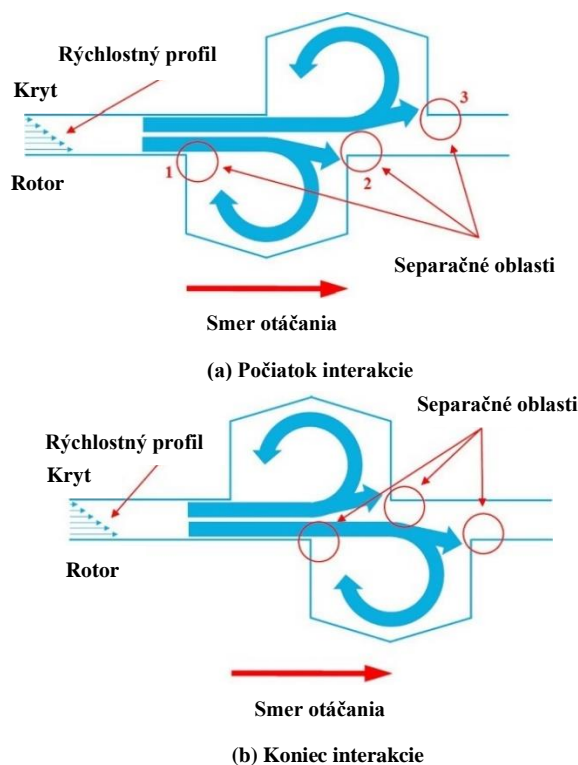


**Obr.14** Schématické zobrazenie reaktora typu rotor-stator [22]



**Obr.15** Detail pracovnej časti [23]

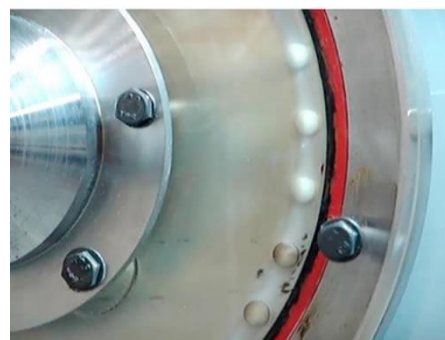
Počas chodu jamky na rotačnej časti interagujú periodicky a neprerušovane s jamkami na časti statickej (krytoch). Na obrázku č. 16. je zobrazená mechanika tejto interakcie. Keď sa prúd priblíži k nerovnosti, rozdelí sa na statickú a pohyblivú časť. Tieto časti sa následne taktiež rozdelia na dve, pričom jedna časť tvorí víry v jamkách a tá druhá naráža na ich zadný okraj, pričom sa vplyvom vírov značne urýchľuje. Takto sa vytvárajú oblasti v ktorých môže dôjsť k vzniku kavitácie, pričom si je možné všimnúť, že tokové polia na začiatku aj na konci interakcie sú takmer identické. Kvapalina je cez vstupný otvor čerpaná na prednú plochu rotora. Do miest s nerovnosťami blízko rotora sa kvapalina dostane pôsobením vysokých odstredivých síl. Prechodom bielej kavitačnej oblasti v tvare šišky (obrázok č. 17) sa kvapalina aj vďaka minimálnej vzdialenosti medzi povrchmi krytu a rotora môže považovať za spracovanú. Kvapalina následne prechádza po prekonaní priestoru medzi rotorom a bočným krytom ďalšou kavitačnou oblasťou na zadnej ploche rotora, a otvorom v zadnom kryte opúšťa reaktor [22].



**Obr. 16** 2D analýza zjednodušeného toku v interakcii s jamkami [22]



Mimo prevádzky



V prevádzke

**Obr. 17** Kavitačná oblasť v tvare šišky na čelnej strane rotora [22]

Uplatnenie hydrodynamických kavitačných reaktorov v priemyselných rozmerov je ešte veľmi mladá a nedostatočne prebádaná oblasť. Výskumu reaktorov sa venuje menšia pozornosť než samotným oblastiam ich uplatnenia. Pre výraznejší posuv v oblasti kavitačných technológií je nutný ďalší výskum v oblasti optimalizácie geometrie reaktorov, dimenzionálnej analýzy, či výpočtových simulácií prúdenia [19]. Nedávne zistenia totiž predpovedajú pokročilým rotačným reaktorom svetlú budúcnosť. Vykazujú dobré vlastnosti pri dezinfekcii potravín [23], čistení vody a mnohých ďalších oblastiach [22], pričom vykazujú dobrú škálovateľnosť spolu s možnosťou navyšovania ich výkonu [19].

## 2.3 OBLASTI VYUŽITIA KAVITÁCIE

V mnohých priemyselných odvetviach sa vykonávajú procesy, ktoré sa dajú využitím kavitačných účinkov vylepšiť a zefektívniť vo viacerých aspektoch. Medzi hlavné odvetvia využívajúce kavitáciu patrí napr. chemický, farmaceutický alebo potravinársky priemysel. Do tohto portfólia spadá aj ropný priemysel, biotechnologický priemysel alebo spracovávanie a čistenie vody. Priemyselné procesy využívajúce účinky kavitácie sa dajú zhruba zhrnúť nasledovne:

- *Procesy homogenizácie a tvorby emulzií*
- *Procesy tvorby suspenzií a dezintegrácie materiálov*
- *Procesy syntézy materiálov*
- *Oxidačné procesy*
- *Miešacie procesy*

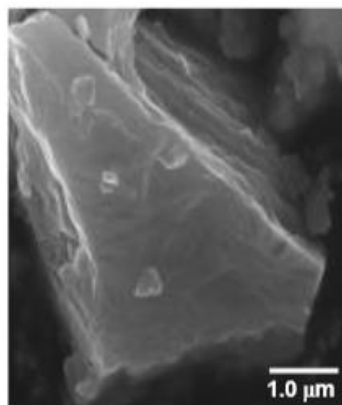
- *Katalyzačné procesy*
- *Extrakčné procesy*

### 2.3.1 CHEMICKÝ PRIEMYSEL

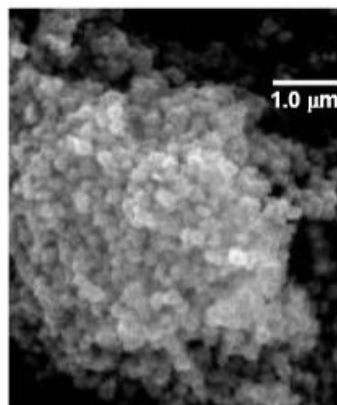
Medzi najstaršie odvetvia s procesmi využívajúcimi kavitáciu nepochybne patrí chemický priemysel. Do tohto odvetvia spadajú napr. procesy tvorby emulzií, sústav dvoch nemiešateľných a vzájomne nerozpustných kvapalín, kde je jedna kvapalina rozptýlená v druhej. Tieto kvapaliny sú všeobecne označované ako olej a voda, pri čom pod olejom sa rozumie kvapalina rozptýlená (dispergovaná). Oproti starším metódam sa pri emulgácii s využitím účinkov ultrazvuku nevyžaduje prítomnosť emulgátorov (stabilizátory emulzie), ktoré zhoršujú chemické vlastnosti výsledného produktu a predražujú celý proces. Obecne povedané, výhody akustickej kavitácie a kavitácie obecné sú oproti konvenčným metódam tvorby emulzií nezanedbateľné. Okrem absencie emulgátorov (v prípade použitia ultrazvuku) zahŕňajú aj menšiu spotrebu energie a produkciu homogénnejších emulzií [6],[13].

Kavitácia nachádza využitie aj v procesoch syntézy anorganických materiálov. Výsledná mikroštruktúra materiálov je jemnejšia a kvalitnejšia. Medzi významné príklady takto vyrábaných materiálov patrí disulfid molybdénu  $\text{MoS}_2$ , ktorý sa vďaka svojej vrstevnatej štruktúre podobnej grafitu, používa ako mazivo v automobilovom priemysle. Má taktiež nezanedbateľný význam v ropnom priemysle, kde sa používa ako katalyzátor pri odstraňovaní síry (desulfurizácii) z fosílnych palív. Na obrázku č.18 je možné vidieť porovnanie medzi konvenčne a sonochemicky (s využitím akustickej kavitácie) pripraveným  $\text{MoS}_2$  [14].

**Konvenčne pripravený  $\text{MoS}_2$**



**Sonochemicky pripravený  $\text{MoS}_2$**



**Obr.18** Morfológia konvenčne a sonochemicky pripraveného  $\text{MoS}_2$  [14]

Medzi o niečo aktuálnejšiu problematiku patrí výskum syntézy nanomateriálov, relatívne nová oblasť s vysokým potenciálom využitia hydrodynamickej kavitácie [19].

Okrem spomínaných procesov sa kavitácia využíva aj pri extrahovaní materiálov, ako je napr. volfrám. Kavitačnou extrakciou je možné ho získať z scheelitu  $\text{CaWO}_4$ , významnej volfrámovej rudy. Tento kov s vysokou teplotou tavenia má širokú škálu využitia, napr. v strojárskom priemysle pri výrobe spekaných karbidov pre obrábacie nástroje, alebo ako materiál

vlákna žiaroviek. Extrahovanie volfrámu z  $\text{CaWO}_4$  pomocou akustickej a hydrodynamickej kavitácie je predmetom aktuálneho vedeckého výskumu [24].

### 2.3.2 FARMACEUTICKÝ PRIEMYSEL

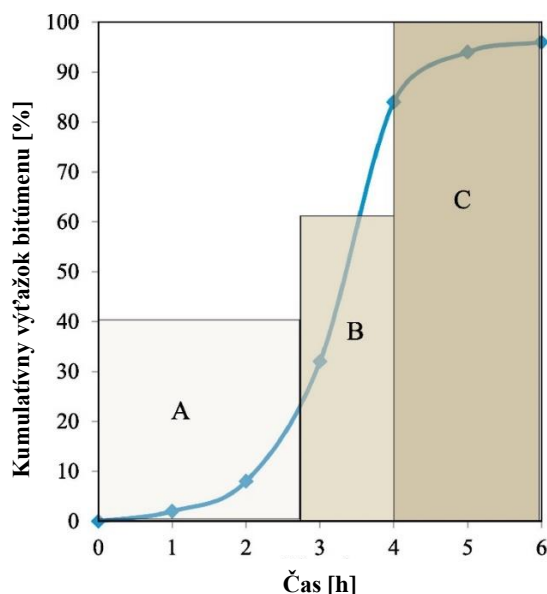
V procesoch výroby liečiv je možné pomocou kavitácie vytvárať homogénnejšie a kvalitnejšie emulzie, ktoré ľudský organizmus po prijatí lepšie toleruje [6]. Kavitačné spracovanie umožňuje presnú kontrolu veľkosti častíc, distribúcie a morfológie farmaceutických prípravkov, čo značne zlepšuje ich účinnosť, keďže prípravky s jemnejšou štruktúrou sa do buniek ľahšie vstrebávajú. Potrebnú energiu pre tieto procesy je možné dodávať aj konvenčnými spôsobmi (homogenizéry, vysokorýchlostné lopatky), výsledkom by však mohla byť degradácia častíc spracovávaného prípravku [18].

### 2.3.3 ROPNÝ PRIEMYSEL

Spracovávanie ropy je jednou z ďalších oblastí uplatnenia kavitačných technológií. Ropa je vysoko heterogénna a komplexná kvapalina, ktorej vlastnosti sú silne ovplyvňované prostredím. Veľmi nízke tlaky pri kavitačnom jave sú schopné štiepiť jej makromolekuly, znižovať jej hustotu arobiť ju homogénnejšiou. To umožňuje zvyšovanie produkcie ropných produktov, zlepšenie kvality palív a zníženie výrobných nákladov [12]. Ropa samotná, ale taktiež iné fosílné palivá, obsahujú množstvo nečistôt, ako je napr. síra. Jej odstraňovanie je kľúčové pre znižovanie znečistenia ovzdušia oxidmi síry, vznikajúcich pri spaľovaní fosílnych palív. S využitím kavitácie je možné vykonávať desulfurizáciu ekologickjším a efektívnejším spôsobom, v porovnaní s konvenčnými metódami [25]. Použitie kavitácie dokáže uľahčiť aj samotnú prepravu ropy a jej produktov potrubím, keďže znižuje jej viskozitu a množstvo usadenín na stenách potrubia [3], [26].

Vzhľadom na ubúdajúce zásoby ropy je čím ďalej tým dôležitejšie sa (okrem hľadania alternatív) zameriavať na nekonvenčné metódy jej ťažby. Medzi hlavné zdroje tzv. nekonvenčnej ropy patria dechtové piesky alebo ropné bridlice. Ich najbohatšie náleziská sa nachádzajú v Severnej Amerike. Využitím kavitačných technológií je možné zefektívniť extrakciu kerogénu z ropných bridlíc, procesu ktorý sa bežne vykonáva pomocou rozpúšťadiel alebo pyrolýzy. Kerogén predstavuje organickú časť ropy, a je možné ho na ňu pretvoriť. Kavitačná extrakcia tejto hmoty je menej energeticky náročná a prebieha pri priaznivejších teplotách v porovnaní s konvenčnými metódami. Podobný princíp je taktiež možné využiť pri extrakcii bitúmenu (živice) z dechtových pieskov. Priebeh tejto extrakcie je znázornený na obrázku č. 19 [26]. Vďaka svojim vlastnostiam by použitie kavitačných technológií mohlo pomôcť zmiernovať už tak veľký ekologický dopad, ktorý takáto ťažba spôsobuje.





**Obr.19** Sonochemická extrakcia bitúmenu z dechtových pieskov [26]

*Oblasť A: Extrakcia olejnatých frakcií bitúmenu, Oblasť B: Neutralizácia živcových zlúčenín a tvorba povrchovo aktívnych látok, Oblasť C: Praskanie asfaltových micel*

Kavitačné spracovanie samotného paliva (benzín, nafta) zvyšuje jeho kvalitu, ako aj kvalitu spaľovania. Molekulárne reťazce sa rozpadajú a vznikajú voľné radikály, ktoré majú vyššiu kapacitu spaľovania, než spojené molekuly. Takéto spracovanie paliva môže viesť k zníženiu jeho spotreby, zvýšeniu výkonu motora a znížovaniu množstva emisií [12].

Kavitáciu je možné použiť aj pri výrobe emulzie vody a mazutu (produkt spracovávania ropy, získava sa z neho asfalt alebo minerálne oleje), čo môže mať za následok zníženie celkovej spotrebu mazutu bez výrazného poklesu jeho kvality. Emulzia vody a mazutu si zachováva všetky dôležité chemické a fyzikálne vlastnosti (spalné teplo, viskozita,...), takže predstavuje lacnejšiu a vhodnú alternatívu. Využitie nachádza napr. ako palivo v tepelných elektrárnach. Náhrada klasického mazutu jeho emulziou môže viesť k zvýšeniu účinnosti nízkoenergetických kotlov, zníženiu emisií, zníženiu tvorby sadzí a taktiež k celkovému zníženiu spotreby paliva [12]. Používanie emulzií vody a ropných olejov má všeobecne pozitívny vplyv na znížovanie emisií [3].

V neposlednom rade je možné kavitáciu využiť aj pri výrobe a sterilizácii chladiacich mazív, kde sa použitie účinkov ultrazvuku taktiež ukazuje ako veľmi efektívna metóda [12].

### 2.3.4 POTRAVINÁRSKY PRIEMYSEL

Požiadavky na efektívnejšie, ekologickejšie spracovanie a neustále rastúca náročnosť aj počet spotrebiteľov dávajú priestor pre využitie kavitácie aj pri spracovaní potravín. Využitie tohto javu má v potravinárskom priemysle už pomerne zabehnutú tradíciu pri tvorbe a homogenizácii emulzií. Medzi najznámejšie príklady patrí homogenizácia mlieka. Týmto procesom sa dosahuje rovnomerné rozdelenie tuku, vyššia homogenita a znížená viskozita mlieka. Zabraňuje sa tým zároveň spätnému zrážaniu tuku a tvorbe smotanovej vrstvy na hladine, čo značne predlžuje jeho trvanlivosť a má pozitívny efekt na kvalitu mlieka. Proces kavitačnej homogenizácie sa dá aplikovať aj rekombináciu sušeného mlieka, významne zvyšujúc jeho kvalitu [12]. Podľa najnovších výskumov v oblasti technológií hydrodynamickej kavitácie sa javí, že ju bude

možné použiť aj k likvidácii patogénov v mlieku, čo by mohlo predstavovať účinnú alternatívu ku klasickej pasterizácii [23]. Okrem mlieka sa takto spracovávajú aj ďalšie známe potravinárske emulzie – margaríny, kečupy, horčice, alebo džúsy [12],[13].

Deštruktívne účinky kavitácie sa dajú využiť aj pri tvorbe suspenzií, zmesí pevných častíc rozptýlených v kvapaline. Do tejto oblasti spadajú napr. intenzifikácia procesu kultivácie pečárnských alebo pivovarských kvasníc, alebo produkcie etanolu pre konzumné účely [12].

V pivovarníctve kavitačné spracovanie zlepšuje kvalitu mladiny, pozitívne vplýva na proces fermentácie a výslednú kvalitu piva. Používa sa aj na recykláciu odpadu vzniknutého pri výrobe vína, ktorý sa môže ďalej využiť, napr. pri výrobe nealkoholických nápojov, či iných potravinárskych, kozmetických alebo farmaceutických produktov. Z oblasti výroby alkoholických nápojov stojí za zmienku aj kavitačné spracovanie dubových triesok, používaných v procesoch zrenia vínnych destilátov [12].



*Obr.20 Ukážka pilotného kavitačného zariadenia od firmy CT Systems pre využitie v pivovarníctve [12]*

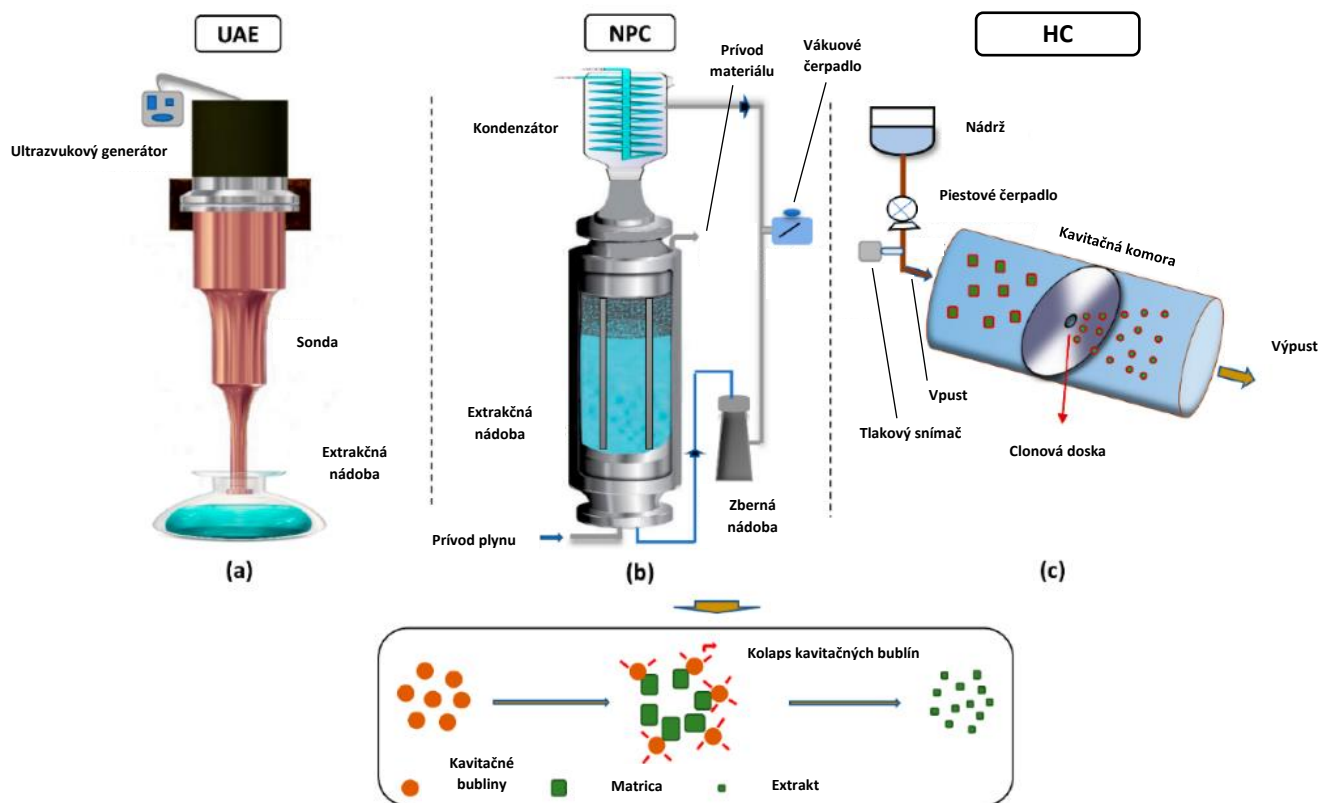
Kavitačné bubliny vznikajúce pôsobením ultrazvuku môžu slúžiť aj ako jadrá iniciujúce a zrýchľujúce proces nukleácie ľadu. Tento jav je možné využiť ako účinnú metódu zmrazovania potravín. Proces zmrazovania sa tak môže výrazne zrýchliť a výsledná kvalita zmrazených potravín zlepšiť. Kavitačné zmrazovanie umožňuje kontrolu rozloženia veľkosti kryštálov v zmrazených výrobkoch, čo sa môže využiť napr. pri výrobe zmrzliny [13].

### **2.3.5 BIOTECHNOLOGICKÝ PRIEMYSEL**

Biotechnologické procesy majú nezanedbateľný dopad na mnoho aspektov nášho života. Plody výskumu a vývoja v oblasti biotechnológií predstavujú zlepšovanie kvality potravín, liekov alebo kozmetiky, a znižovanie celkovej environmentálnej záťaže. Oblasť použitia kavitácie v biotechnológiách je vzhľadom na neúnavnú snahu spoločnosti presadzovať ekologickejšie alternatívy všade kde je to možné, veľmi perspektívna a rozrastajúca. Patria sem napr. procesy extrakcie prírodných produktov, potrebných pre už spomínanú výrobu potravín, liekov alebo kozmetiky. Výslednú efektivitu kavitačnej extrakcie ovplyvňujú viaceré faktory, ako typ reaktora, charakteristiky rozpúšťadla, či teplota a tlak počas prevádzky [20]. Predmetom biotechnológií je aj zlepšovanie poľnohospodárskej produkcie, alebo výroba biopalív [13].

Práve biopalivá sú v dnešnej dobe často skloňovaným pojmom. Ich dôležitosť vzhľadom na vyčerpávanie zdrojov fosílnych palív (najmä ropy) a ich benefitom pre životné prostredie neustále narastá. Práve kavitácia by mohla byť cenovo prijateľným nástrojom k zvyšovaniu ich produkcie. Výchrevnosť najznámejších príkladov biopalív – bionafty, bioplynu a bioetanolu je porovnateľná s konvenčnými fosílnymi palivami. K perspektívnym biopalivám sa zaraďuje aj vodík. Zdrojom až 95% súčasne produkovaných biopalív sú jedlé oleje, avšak vhodné zdroje predstavujú aj živočíšne tuky, nejedlé či odpadné oleje, alebo riasy [27].

Kavitačná extrakcia môže byť vykonávaná na základe pôsobenia ultrazvuku, hydrodynamickej kavitácie ale aj tzv. podtlakovou kavitáciou (typ hydrodynamickej kavitácie). Najnovšie sa tieto metódy aj kombinujú pre dosahovanie čo najoptimálnejších výsledkov. Na obrázku č.21 je možné vidieť reaktory pre spomínané metódy extrakcie. Medzi hlavné výhody oproti konvenčným metódam extrakcie (Soxhletova extrakcia, macerácia,...) patrí podobne ako aj pri iných oblastiach znížená spotreba energie, vyššia účinnosť, zrýchlenie celého procesu a vyššia kvalita extraktu. Na rozdiel od konvenčných metód prebieha pri priaznivých teplotách, z čoho profitujú komponenty extraktu citlivé na vysoké teploty. Výskumy potvrdzujú skvelé výsledky pri kavitačnom extrahovaní prírodných produktov, ako sú príchuť, vôňa, farbivá, esenciálne oleje, konzumné oleje, polysacharidy, proteíny, tuky alebo bioaktívne látky z rôznych matric (potravin, rastliny, mikroorganizmy) [20].



**Obr.21** Typy kavitácie a reaktorov pre procesy extrakcie prírodných produktov [20]

(a) ultrazvuková extrakcia (ultrasound-assisted extraction UAE), (b) extrakcia podtlakovou kavitáciou (negative pressure cavitation NPC), (c) extrakcia hydrodynamicickou kavitáciou (hydrodynamic cavitation HC)



**Obr.22** Ukážka pilotného kavitačného zariadenia od firmy CT Systems na extrakciu etanolu z bylín [12]

Obavy spojené s využitím kavitácie pre extrakciu prírodných produktov sa týkajú predovšetkým degradácie extraktu, alebo efektivity tejto metódy vo veľkých meradlách. Predpokladá sa preto, že užitočná bude v budúcnosti najmä metóda extrakcie hydrodynamickou kavitáciou, konkrétne podtlakovou [20].

Využitím kavitácie, konkrétne ultrazvuku, sa taktiež dá zefektívniť prenos genetických informácií v poľnohospodárskych rastlinách. Zmeny v DNA dokážu zvýšiť produkciu plodín, alebo zlepšiť ich odolnosť voči škodcom, herbicídom alebo soľam [13].

### 2.3.6 ČISTENIE A ÚPRAVA VODY

Oblasť čistenia vôd patrí v súčasnosti k najviac skúmaným čo využitia kavitácie týka, a venuje sa jej značná pozornosť. Kvôli narastajúcemu znečisteniu spôsobovaného priemyslom, poľnohospodárskymi činnosťami a produkciou odpadu, ale aj kvôli klimatickým zmenám, je dostupnosť kvalitnej pitnej vody čoraz vzácnejšia. Spôsoby ako túto situáciu zlepšiť sú buď sa snažiť znižovať celkové znečistenie, alebo hľadať nové efektívne spôsoby čistenia vody [28]. Možnosti využitia kavitácie v tejto oblasti sú skutočne pôsobivé. Aktuálne výskumy, najmä čo sa hydrodynamickkej kavitácie týka, ukazujú, že je účinná pri odstraňovaní zložiek, ktoré sa konvenčnými metódami (biodegradácia, filtrácia, sedimentácia,...) odstraňujú veľmi ťažko, alebo neekologicky. Patria sem rôzne priemyselné farbivá, zvyšky liečiv a iné kontaminanty, ktoré môžu spôsobovať chronické choroby, ako je cukrovka, Parkinsonova choroba, Alzheimerova choroba, alebo aj rakovina. Do skupiny takýchto látok sa zaradujú aj poľnohospodárske pesticídy a insekticídy, patogénne mikroorganizmy (napr. baktérie a vírusy) spôsobujúce choroby ako cholera alebo týfus, vodné sinice a mikroorganizmy [27].

Keďže sa jedná o metódu nevyužívajúcu chemikálie, nemôže sa stať, že by výsledkom kavitačného spracovania vody boli aj nejaké toxické vedľajšie produkty (ako pri používaní chlóru) [28].

Pri likvidovaní mikroorganizmov kavitáciou sa využíva kombinácia mechanických účinkov (turbulencie, cirkulačné prúdy a šmykové napätia), chemických účinkov (tvorba voľných aktívnych radikálov), tepelných účinkov a kombinovaných účinkov (pridanie chemických látok

ako  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  a  $\text{O}_3$  ku kavitačnému procesu). Pri pozorovaní sa zistilo, že najväčší vplyv na dezinfekciu mikroorganizmov majú práve mechanické účinky, pričom chemické a tepelné majú iba podpornú úlohu [13].

Pri úprave odpadných vôd môže byť kavitácia použitá aj ako doplnok ku konvenčnej biologickej oxidácii pre znižovanie toxicity vôd, inak povedané, k zlepšeniu biologickej odbúrateľnosti. Zlepšuje proces stabilizácie splaškového kalu, suspenzie vzniknutej pri čistení odpadných vôd. Stabilizácia prebieha anaeróbnym rozkladom, čo následne umožňuje zneškodnenie kalu spôsobom bezpečným pre životné prostredie. Kavitačné reaktory značne redukovávajú časovú náročnosť tohto procesu, ktorý pri bežných metódach môže trvať aj 30 až 40 dní. Kavitácia výrazne zlepšuje aj proces úpravy vôd pomocou aktivovaného kalu alebo procesu zmenšovania objemu splaškového kalu jeho vysúšaním. Čistenie odpadovej vody produkuje veľké množstvo kalu, ktoré sa odhaduje na 5 až 25% z celkového objemu upravenej vody, pri čom kal obsahuje viac ako 95% vody [13].

Spracovanie vody s využitím účinkov kavitácie sa však nekončí pri čistení odpadných vôd. Uplatnenie nachádzajú kavitačné reaktory aj na nákladných lodiach pri úprave balastnej vody, ktorá je na nich prevážaná na veľké vzdialenosti. Odhaduje sa, že ročne sa po svete prepraví 2 až 3 miliardy ton balastnej vody, ktorá obsahuje veľké množstvo vodných organizmov. Ich neustále presuny (bioinvázia) môžu ohroziť prirodzene vyvinutú biodiverzitu v konkrétnych lokalitách [13].

Pri kavitačnom spracovaní sa voda obohacuje kyslíkom a zbavuje sa oxidu uhličitého, čo môže byť využité aj napr. v poľnohospodárstve. Pri zavlažovaní takto spracovanou vodou sa pôda prevzdušňuje a mení sa jej pH. Rastliny rastú rýchlejšie, plody sa tvoria skôr, a obsahujú menej dusičnanov či iných škodlivín. Kavitačné spracovanie zavlažovacej vody teda umožňuje zvýšenie množstva a kvality vypestovaných plodín pri minimálnej spotrebe energie [29].

### 2.3.7 ČISTENIE PEVNÝCH POVRCHOV

Využitie ultrazvuku je už časom overená a účinná metóda pre čistenie ťažko prístupných povrchov, alebo povrchov zložitých tvarov. Širokej verejnosti sa dostalo do povedomia najmä jeho využitie v klenotníctve, alebo medicíne. Spravidla mu predchádza ručné čistenie, ktoré sa používa na hrubé očistenie. Ultrazvukové čističe (konkrétne ultrazvukové vane) sa používajú na odstránenie jemných nečistôt, mikroorganizmov alebo lakov z povrchov súčiastok. Touto metódou je možné povrchy aj odmasťovať, alebo zbavovať okují po tepelnom spracovaní. Oproti ručnému čisteniu taktiež prinášajú ultrazvukové čističe konzistentnejšie výsledky. Očividným nedostatkom tejto metódy čistenia je fakt, že po dlhšej dobe vystavenia účinkom akustickej kavitácie podliehajú čistené povrchy kavitačnej erózii [6],[ 30].

# 3 TECHNOLOGICKÉ VYUŽITIE HYDRODYNAMICKEJ KAVITÁCIE

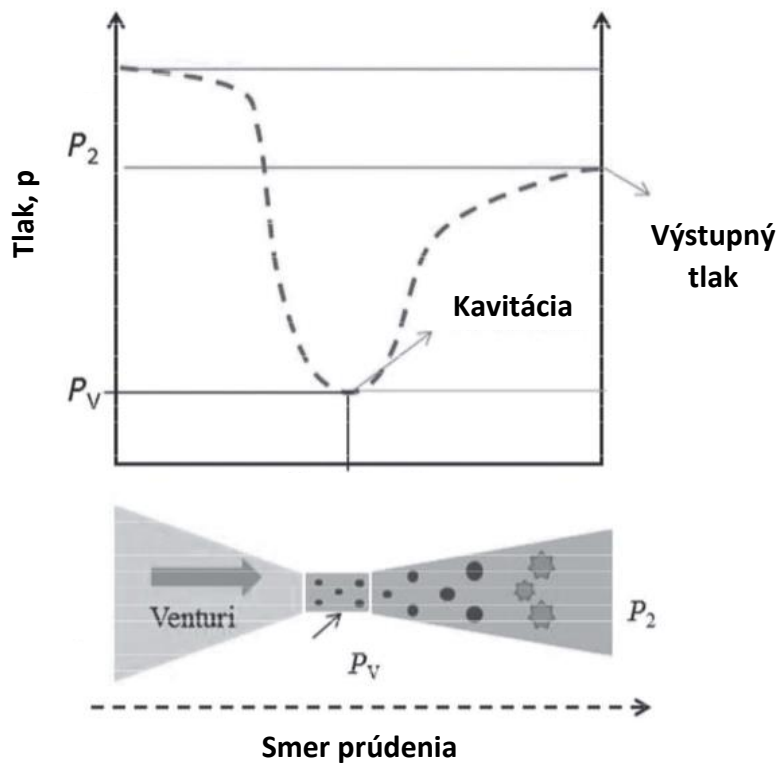
## 3.1 HYDRODYNAMICKÁ KAVITÁCIA

Hydrodynamickú kavitáciu je pomerne ľahké vytvoriť pomocou zúžení v prietoku kvapaliny, napr. pomocou clonových dosiek, Venturiho trubice alebo škrtiacich ventilov. Zúžením prierezu dochádza k zvýšeniu prietokovej rýchlosti (zvyšuje sa kinetická energia) sprevádzanému poklesom tlaku, tak ako to popisuje rovnica kontinuity (1), resp. Bernoulliho rovnica (2) [31]. Pri dostatočnom znížení tlaku dochádza ku kavitácii, ako je to popísané v kapitole 1.1. Na obrázku č. 23 je zobrazený princíp hydrodynamickkej kavitácie. Za zúžením taktiež dochádza v kvapaline k turbulenciám, ktorých intenzita závisí na veľkosti tlakových zmien. Tie sú ovládateľné nastavenou geometriou a prevádzkovými podmienkami hydrodynamických kavitáčnych reaktorov [13].

$$Q = v \cdot S = \text{konšt.} \tag{1}$$

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot h = \text{konšt.} \tag{2}$$

V rovniciach (1) resp. (2) predstavuje  $Q$  objemový prietok,  $v$  rýchlosť kvapaliny,  $S$  plochu prierezu trubice,  $p$  tlak v trubici,  $\rho$  hustotu kvapaliny,  $g$  gravitačné zrýchlenie a  $h$  polohu prúdnice v gravitačnom poli [31].



Obr.23 Princíp hydrodynamickkej kavitácie [32]

Intenzitu kavitácie a počiatočnú veľkosť kavitačných jadier vyjadruje bezrozmerná veličina, známa ako kavitačné číslo ( $C_v$ ). Matematicky je možné ho opísať nasledovne [32]:

$$C_v = \frac{p_2 - p_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2} \quad (3)$$

kde  $p_2$  označuje výstupný tlak,  $p_v$  je tlak sýtych pár,  $v_0$  je priemerná rýchlosť kvapaliny v zúžení a  $\rho$  predstavuje hustotu kvapaliny [32].

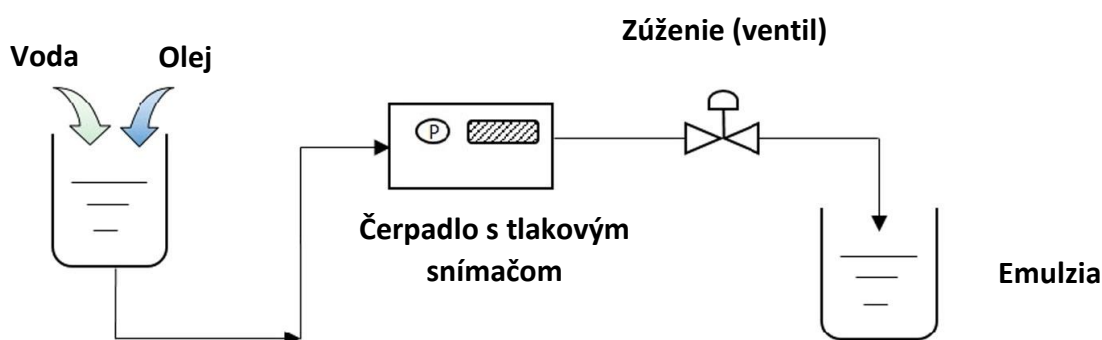
Pri kavitačnom čísle  $C_v \leq 1$  dochádza ku kavitácii, avšak najlepšie operačné podmienky sú dosiahnuté v prípade, že sa hodnota  $C_v$  pohybuje v rozmedzí 0,1-1. K vzniku kavitačných bublín dochádza aj pri hodnotách  $C_v > 2$ , ale nedochádza k ich kolapsu. Z rovnice (3) vyplýva, že ideálne podmienky pre vznik kavitácie sú nízke tlaky a vysoká rýchlosť prúdiacej kvapaliny. Minimálna rýchlosť kvapaliny ( $C_v = 1$ ) vedúca ku kavitácii je vyjadrená ako [32]:

$$v_{min} = \sqrt{\frac{p - p_2}{0,5 \cdot \rho}} \quad (4)$$

## 3.2 PERSPEKTÍVNE OBLASTI VYUŽITIA HYDRODYNAMICKEJ KAVITÁCIE

### 3.2.1 VÝROBA A HOMOGENIZÁCIA EMULZIÍ

Výroba emulzií konvenčnými zariadeniami (homogenizérom, fluidizátorom, koloidnými mlynmi) ako aj akustickou kavitáciou sa javí neefektívna v kontexte spracovania veľkých objemov. Pri nízkoenergetických metódach ako je membránová alebo mikro-kanálová emulgácia je zas hlavná nevýhoda v zlej kontrole dosahovania požadovanej veľkosti dispergovaných častíc a vo vysokých nákladoch. Vzhľadom na tieto skutočnosti predstavuje hydrodynamická kavitácia lepšiu variantu. Obrázok č. 24 znázorňuje schematický priebeh takéhoto procesu [27].



**Obr.24** Schéma emulgačného procesu s využitím hydrodynamической kavitácie [33]

V štúdiách bola spracovaním hydrodynamickou kavitáciou zistená zvýšená stabilita nanoemulzií (až tri mesiace) ako napr. horčičný olej vo vode, pričom najvhodnejší typ reaktora pre dosiahnutie čo najmenších kvapôčok bola štrbinová Venturiho trubica. Účinky hydrodynamической kavitácie sa skúmali aj pri výrobe emulzií kokosového oleja s vodou, pričom najmenšia veľkosť kvapôčok bola v tomto prípade zaznamenaná pri použití kruhovej Venturiho trubice, avšak štrbinová trubica dosahovala redukcie veľkosti kvapôčok rýchlejšie. Výrobou emulzií zo sójového

oleja, heptánu alebo ricínového oleja s vodou, bola dosiahnutá stabilita emulzie až po dobu ôsmich mesiacov [27].

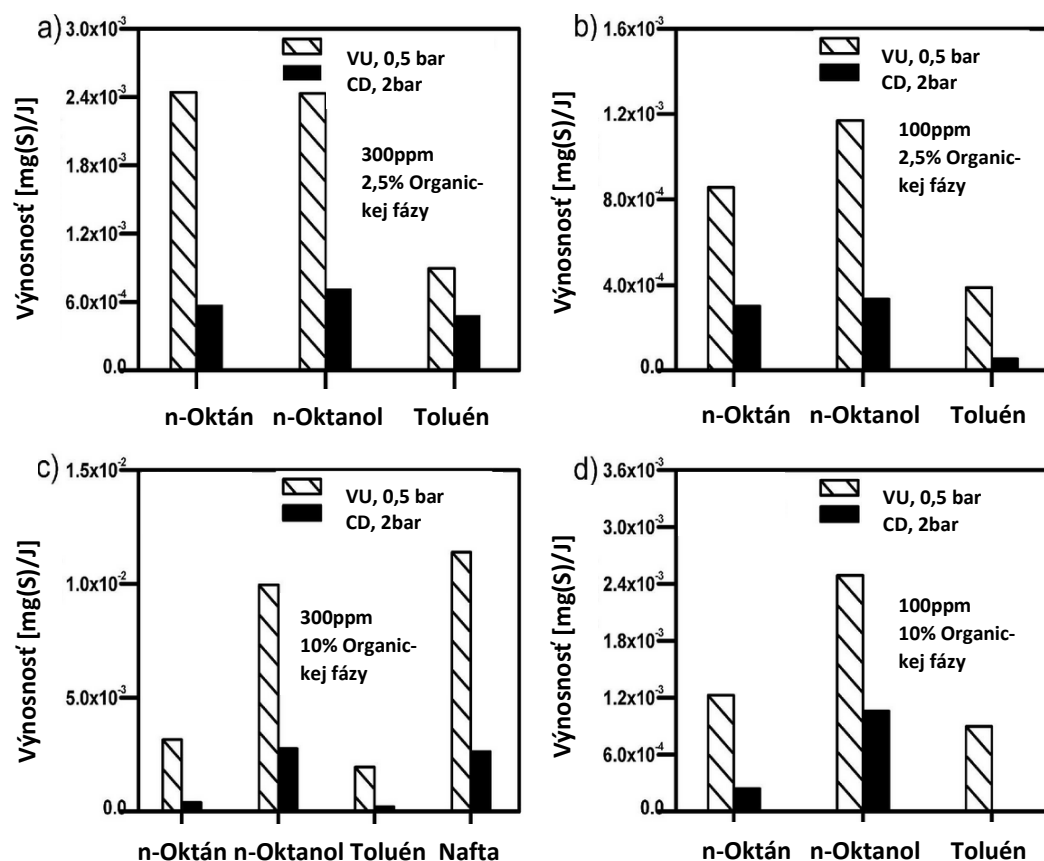
Použitie hydrodynamických reaktorov pre výrobu emulzií pre potravinársky, farmaceutický alebo kozmetický priemysel sa teda vo väčšine prípadov ukazuje v pozitívnom svetle. Nevýhodou použitia hydrodynamической kavitácie oproti akustickej je však v tomto prípade potreba použitia emulgátorov (napr. polysorbát 80 alebo dodecylsírán sodný) pre stabilizovanie emulzie [27].

### 3.2.2 DESULFURIZÁCIA FOSÍLNYCH PALÍV [25]

Odstraňovaním nečistôt z fosílnych palív by bolo možné zmierniť už tak enormné znečistenie prostredia, ktoré spôsobuje ich spaľovanie. Jednou z najznámejších prímiesí fosílnych palív je síra, ktorej oxidy  $SO_x$  unikajú pri spaľovaní do ovzdušia. Problematika redukcie množstva síry emitovanej do prostredia je veľmi aktuálna, keďže alarmujúce hodnoty znečistenia ovzdušia, najmä vo veľkých mestách, predstavujú čoraz väčší problém a vlády po celom svete presadzujú čoraz prísnejšie normy kontroly emisií. Redukcia síry je dôležitá aj v kontexte čo najúčinnšieho a najekologickejšieho využitia bionafty, ktorá jej taktiež obsahuje značné množstvo. Konvenčná hydrodesulfurizácia vyžaduje ďalšie dodatočné procesy (oxidáciu, adsorpciu), vysoké teploty ( $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a tlaky (20-40 atm) čo celú operáciu predlžuje a predražuje.

Predmetom uvažovanej štúdie indických výskumných inštitúcií bolo zisťovanie efektívnosti použitia hydrodynamической kavitácie pri desulfurizácii ropných derivátov (nafty, n-oktánov, n-oktanolov a toluénu), pričom bola porovnávaná účinnosť reaktorov s clonovou doskou a vŕtovým usmerňovačom (typ rotačného reaktora). Pokusy boli vykonávané po dobu 2 h. Na obrázku č. 25 sú zobrazené výnosnosti desulfurizácie hydrodynamickou kavitáciou pre rôznu koncentráciu síry v rozpúšťadlách (100 a 300 ppm (parts per million)) a rôzny podiel objemu organickej fázy rozpúšťadiel (2,5% a 10%).





**Obr.25** Porovnanie výnosností desulfurizácie pri použití clonovej dosky CD a vírového usmerňovača VU [25]

Záverom bolo teda zistené, že obe typy reaktorov potvrdzujú vysokú účinnosť pri desulfurizácii ropných derivátov oproti konvenčným metódam. Obe zariadenia ponúkajú ľahkú prevádzku a výrazné zníženie prevádzkových nákladov. Desulfurizáciu však výrazne ovplyvňuje typ rozpúšťadla, najlepšie výsledky boli zaznamenané pri n-oktanole a nafte. Pri porovnávaní kavitačných zariadení vyšiel ako výrazne lepší, čo sa týka výnosnosti a nákladov na prevádzku, typ s vírovým usmerňovačom. Uvedené zistenia naznačujú, že hydrodynamická kavitácia môže byť aplikovaná ako efektívny nástroj rozsiahlych desulfurizačných operácií.

### 3.2.3 SYNTÉZA NANOMATERIÁLOV [19]

Nanomateriály sú často skloňované s vývojom pokrokových technológií a považujú sa za materiály budúcnosti. Preto s časom rastie aj dôležitosť technológií efektívnej výroby nanomateriálov, kde sa ako s možným nástrojom vďaka dobrej škálovateľnosti uvažuje práve s hydrodynamickými kavitačnými reaktormi.

Prvá štúdia spojená s využitím hydrodynamickej kavitácie pre prípravu nanomateriálov bola zverejnená v roku 2019, pričom bol preukázaný jej pozitívny vplyv na zväčšovanie povrchu biouhľia (o 120%) pri zachovaní či zlepšení jeho chemického zloženia. Oproti konvenčným metódam vykazuje taktiež vyššiu ekonomickú účinnosť. Rozvoj tejto perspektívnej oblasti predstavuje náročnú výzvu, ktorá však môže viesť k lacnejšej a dostupnejšej produkcii nanomateriálov v priemyselných rozmeroch. Dôležitú oblasť v tomto kontexte predstavuje najmä vývoj kavitačných reaktorov.

### 3.2.4 SYNTÉZA CELULÓZY Z CITRUSOVÉHO ODPADU [34]

Odpadná hmota z citrusových plodov môže predstavovať cenný zdroj celulózy, polysacharidu kľúčového pre papierenský a textilný priemysel. Bežne sa celulóza vyrába z dreva, čo znamená že jej získavanie z alternatívnych zdrojov by mohlo pomôcť spomaliť odlesňovanie a zmierniť klimatickú zmenu. Izolácia celulózy z rôznych druhov biologického odpadu bez potreby použitia chemikálií bola už cieľom mnohých výskumov, avšak nie veľmi úspešných. Práve hydrodynamická kavitácia by mohla predstavovať potrebný prielom v tejto oblasti.

Výsledkom práce talianskych výskumných inštitúcií v Palerme a Sesto Fiorentino zameranej na spracovanie citrusového odpadu bol objav biomateriálu bohatého na celulózu, nazvaného “CytoCell”, extrahovaného z citrónového a grapefruitového odpadu s využitím hydrodynamickej kavitácie.



**Obr.26** Disk z citrónovej “CytoCell” vyrobený pozvoľným sušením vodnej pasty [34]

Objavená forma celulózy vykazuje dobré schopnosti zadržiavať vodu (gram takejto celulózy zadrží 10 gramov vody), extrémne malú veľkosť kryštálov (0,35) a veľkú mezoporozitu (veľkosť pórov >25 nm). Nástroj esterifikácie vlákien celulózy je v tomto prípade kyselina citrónová  $C_3H_5O(COOH)_3$  bežne sa vyskytujúca v citrusových plodoch. Nepotrebnosť použitia iných kyselín, oxidantov alebo enzýmov je dôkazom ekologickej využitia hydrodynamickej kavitácie. Proces s hydrodynamickou kavitáciou je ľahko škálovateľný, s nízkymi prevádzkovými nákladmi, využíva obnoviteľné zdroje a netvorí odpad, čo ho nepochybne povyšuje do úrovně vysoko perspektívnych nástrojov ekologickej výroby celulózy.

### 3.2.5 EXTRAKCIA PRÍRODNÝCH PRODUKTOV

Už v kapitole 2.3.5 bolo načrtnuté, že v poslednom čase sa upriamuje pozornosť na kavitačné technológie ako nástroj efektívnej extrakcie užitočných látok z prírodných produktov. Výskumné štúdie sa zameriavajú na všetky typy hydrodynamických reaktorov, či už sa jedná o Venturiho trubicu, clonové dosky alebo typ rotor-stator [27]. Hoci je v tejto oblasti už preukázaná solídna účinnosť ultrazvukovej extrakcie na bázi akustickej kavitácie, hydrodynamická kavitácia predstavuje opäť porovnateľnú a v niektorých prípadoch aj účinnejšiu alternatívu. Vysoký potenciál ukazuje extrakcia podtlakovou kavitáciou, ktorá sa hodí na extrakciu látok citlivých na vysoké teploty viac, než použitie ultrazvukovej extrakcie [20].

### **Bioaktivné látky**

Pri výskume sa reaktor typu rotor-stator ukázal účinným pri spracovaní škrupín kakaových bôbov, ktoré sú bohaté na flavonoidy, mastné kyseliny, polyfenoly a prirodzene aj kakaové maslo. Táto technológia bola úspešne demonštrovaná aj ako doplnujúci nástroj pri extrakcii enzýmov z kvasiniek. Výrazne sa zvýšila disrupcia bunkových stien, čo malo za následok až 4,79-krát vyššiu selektivitu pri získavaní enzýmov, pri 63,19 krát vyššej energetickej účinnosti v porovnaní s klasickým homogenizátorom. Použitie hydrodynamickej kavitácie vykazovalo pozoruhodné výsledky aj pri extrakcii zlúčenín z ihličia alebo odpadových kôr citrusových plodov (hesperidín – koniec podkapitoly) [27].

Vo výskumoch zameraných na využitie podtlakovej kavitácie boli zistené nové možnosti efektívnej extrakcie flavonoidov, fenolov alebo alkaloidov, ako aj mnohých ďalších bioaktívnych látok. Oproti konvenčným metódam bol zistený vyšší výťažok látok s vysokým antioxidantným účinkom z ľanových semien alebo palisandrového dreva, pričom jeho kvalita bola porovnateľná s metódou ultrazvukovej extrakcie. Rovnako pozitívnych výsledkov sa dosiahlo aj pri extrahovaní látok z indického hrachu (*Cajanus cajan*), strukoviny s antioxidantnými, protizápalovými a anti-mikrobiálnymi účinkami [27].

### **Lipidy**

Extrakcia lipidov z olejnatých mikroorganizmov, napr. rias, je ďalším vzorovým príkladom účinného uplatnenia hydrodynamickej kavitácie. K extrahovaniu lipidov (neutrálnych, fosfolipidov, glykolipidov, voľných mastných kyselín) sa môžu použiť rôzne typy hydrodynamických reaktorov. Pri výskume extrakcie lipidov z mokrých rias (*Nannochloropsis salina*) bola pri použití reaktora s Venturiho trubicou zaznamenaná výnosnosť o hodnote až 99%. Na porovnanie, pri použití ultrazvuku bola táto hodnota maximálne 26,9%. Výskum uvažoval aj s použitím clonových dosiek. Metóda použitia hydrodynamickeho reaktora sa osvedčila aj pri extrakcii lipidov zo suchých rias, vhodných pre produkciu bionafty, kde sa hodnoty výnosnosti pohybovali okolo 93% [20], [27].

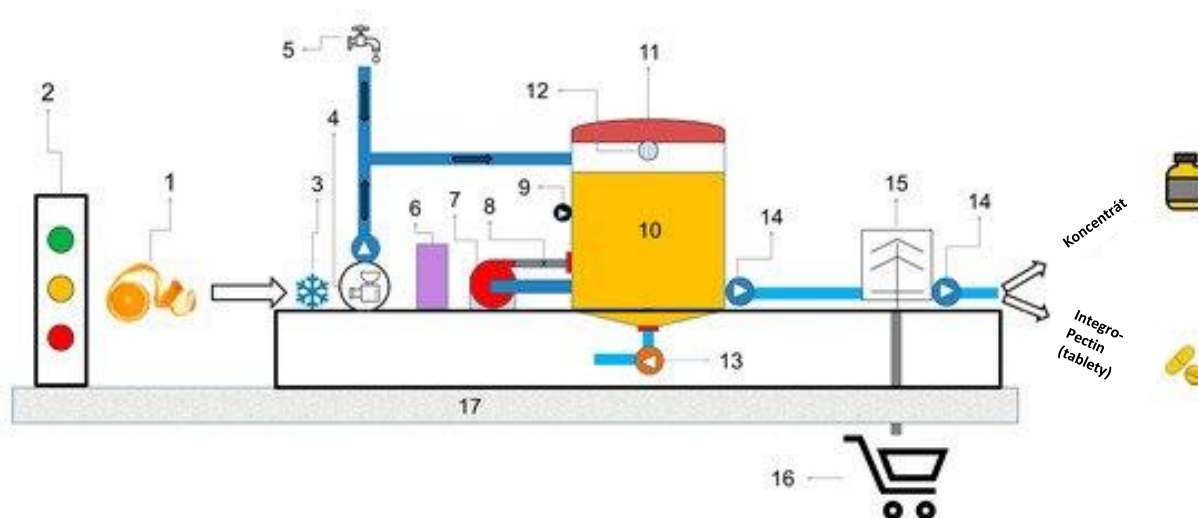
### **Proteíny**

Prírodné produkty bohaté na proteíny, ako sú sója alebo pšeničné klíčky je taktiež možné spracovávať technológiami založenými na hydrodynamickej kavitácii. Experimentom bolo zistené, že extrakciou sójového proteínu s využitím hydrodynamickej kavitácie (Venturiho trubica) bola výnosnosť okolo 82 %, s využitím ultrazvuku približne 72% [20].

### **Hesperidín ako potenciálny nástroj proti COVIDu-19**

Hesperidín je flavonoidný glykosid, dominantne zastúpený v citrusových plodoch, predovšetkým v kôrach pomarančov a citrónov. Jeho účinnosť voči špecifickým vírusom, ako sú vírusy chrípky alebo herpesové vírusy, bola známa už dlhšiu dobu. Počas dozvukov epidémie vírusu SARS-CoV na začiatku druhého tisícročia bolo zistené, že jeho aglykón hesperetín bol spomedzi všetkých prírodných a syntetických produktov najúčinnější v boji proti tomuto koronavírusu. Nie je preto prekvapujúce, že sa jeho účinky a možnosti jeho extrakcie skúmali aj v súvislosti so súčasnou pandémiou. Pri terapeutickom použití vykazuje silnú väzbovú afinitu k vírusovým a bunkovým cieľom, a je vhodný aj pre dlhodobé používanie. Mohol by byť účinný aj voči ťažkým formám COVIDu-19, keďže spolu s ďalšími flavonoidmi v citrusových kôrach vie zabrániť nadmernej imunitnej reakcii organizmu [35].

Bežnými prostriedkami sa hesperidín extrahuje zdĺhavým procesom za použitia veľkého množstva minerálnych kyselín a následným ohrievaním pri 45°C cez noc. Použitím hydrodynamickej kavitácie je možné urýchliť a zefektívniť proces extrakcie flavonoidov, esenciálnych olejov a pektínov bohatých na hesperidín z citrusovej kôry. Na obrázku č. 27 je možné vidieť navrhovaný proces použitia hydrodynamického reaktora, konkrétne typ s Venturiho trubicou, ten však spolu s odstredivým čerpadlom môže byť nahradený typom rotor-stator. Modifikácie sú možné vo viacerých aspektoch. Produktom takého spracovania môžu byť vodné extrakty alebo pektínové tablety (IntegroPectin) [35].



**Obr.27** Hlavné zložky navrhovaného procesu extrakcie hesperidínu [35]

1- odpadné citrusové kôry, 2- elektronický kontrolný panel, 3 – stroj na výrobu ľadu, 4 – mlynček, 5 – zdroj vody, 6 – invertor, 7 – odstredivé čerpadlo, 8 – hydrodynamický kavitačný reaktor (napr. Venturi), 9 – dávkovacie čerpadlo, 10 – pracovná nádoba, 11 – poklop, 12 – umývacía sféra, 13 – západkové čerpadlo, 14 – viacstupňové čerpadlo, 15 – separátor, 16 – výpust zvyškov, 17 – šmyková lišta

Výskum v tejto oblasti je dôležitý nielen kvôli súčasnej situácii, ale môže predstavovať podklad pre účinný boj s ďalšími vírusmi, s ktorými sa ľudstvo v budúcnosti nevyhnutne stretne.

### 3.2.6 VÝROBA BIOPALÍV

Ako už bolo načrtnuté, hľadanie spôsobov veľkokapacitnej výroby biopalív by mohlo predstavovať zníženie odkázanosti populácie na používanie fosílnych palív, čo by znamenalo výrazné redukovanie záťaže na životné prostredie. V súčasnosti sa biopalivá vyrábajú nákladným a nie príliš efektívnym spôsobom, spravidla katalytickou premenou olejov na masné kyseliny a glycerol spolu s metanolom. Rôzne výskumy naznačujú, že využitie účinkov hydrodynamickej kavitácie má potrebné vlastnosti pre rýchlejšiu, hospodárnejšiu a ekologickjšiu výrobu (esterifikáciu) kvalitnejších biopalív [27].

#### **Bionafta (Metylester)**

Pre výrobu bionafty je možné použiť predovšetkým rôzne druhy rastlinných ale aj živočíšnych olejov. Okrem klasického prístupu použitia nespracovaného oleja je tu možnosť, ako to uvádzajú nižšie popísané štúdie, použitia odpadných alebo požitých olejov na vyprážanie.

Recyklovanie použitého oleja určite dáva zmysel, keďže pestovanie olejnatých rastlín (repka, sója, palmy, kaučukovníky,...) iba pre účely výroby bionafty môže predstavovať ďalšie rozširovanie rastlinných monokultúr, čo môže spôsobovať environmentálny problém.

Na využitie použitého oleja na vyprážanie sa zameriavala napr. už štúdia z roku 2013 [36], ktorá potvrdila výhody hydrodynamických kavitačných reaktorov (porovnávali rôzne usporiadania clonových dosiek) nad akustickou kavitáciou a vhodnosť použitia tohto lacného materiálu. Nedávna štúdia [37] porovnávala konvenčné metódy s použitím hydrodynamickej kavitácie pri produkcii bionafty a glycerolu z panenského a použitého kuchynského oleja. Použitý olej vyžadoval predspracovanie, ale náklady na chemikálie boli o 90% nižšie v porovnaní s panenským olejom, ktorý však predspracovanie nevyžaduje, a tým boli náklady na inžinierske siete v jeho prípade nižšie o 40%. Záverom bolo zistené, že metóda s hydrodynamickou kavitáciou spotrebuje o 40% energie menej v porovnaní s konvenčnými metódami.

Výborné vlastnosti hydrodynamickej kavitácie potvrdili aj ďalšie štúdie. Experimentovaním s rôznymi reaktormi, bola pri štrbinovej Venturiho trubici nameraná výnosnosť bionafty z kuchynského oleja 90%. Vysoká výnosnosť je spôsobená najmä turbulenciami vznikajúcimi pri kavitácii. Dobré výsledky boli dosiahnuté aj pri experimentoch s palmovým (clonové dosky) alebo kaučukovým (rotor-stator) olejom. Vysoká výnosnosť bola sprevádzaná krátkou prevádzkovou dobou (rádovo minúty). Novšie štúdie zamerané na použité kuchynských olejov zistili pri použití Venturiho trubice a 100-dierovej clonovej doske výnosnosti dokonca až 97,56 resp. 99% [27].

### ***Bioetanol***

Najlepším dostupným zdrojom pre výrobu bioetanolu sa javí byť lignocelulózová biomasa. Tá však pozostáva z viacerých látok, pričom najväčšiu prekážku predstavuje štruktúra celulózy, ktorá bráni enzymatickej hydrolýze. Na vyriešenie tohto problému už bolo preskúmaných niekoľko nie veľmi úspešných metód. Hydrodynamická kavitácia sa aj v tomto prípade ukázala byť účinná, čo potvrdzujú štúdie ktoré skúmali výrobu etanolu z trstia, cukrovej trstiny alebo mletej kukurice. S použitím reaktora s clonovou doskou sa hodnoty výnosnosti dostali nad 90% [27].

### ***Bioplyn***

Bioplyn predstavuje ďalšiu z perspektívnych náhrad fosílnych palív. Podobne ako v prípade bioetanolu je možné ho syntetizovať z lignocelulózovej biomasy. Hydrodynamická kavitácia je vhodná na predspracovanie tejto biomasy, zlepšujúc jej mikrobiálnu degradáciu redukovaním štruktúrnych prekážok (podobne ako pri bioetanole). Táto metóda sa skúmala na predspracovaní pšeničnej slamy a poľnohospodárskej biomasy reaktorom typu rotor-stator, kde výnosnosť 172,3 ml bioplynu z gramu biomasy jednoznačne prekonala konvenčné alkalické predspracovanie. Metóda hydrodynamickej kavitácie sa osvedčila aj pri získavaní bioplynu z odpadných vôd a splaškového kalu, kde sa jeho produkcia zvýšila o 30%. Viaceré ďalšie štúdie potvrdili účinnosť a výhodnosť predspracovania hydrodynamickou kavitáciou pred anaeróbnou digestiou [27].

## **3.2.7 SPRACOVANIE POTRAVÍN**

Hydrodynamická kavitácia ukazuje potenciál byť účinným nástrojom na miešanie, zahusťovanie, homogenizáciu a sterilizáciu potravín vo veľkých meradlách. Jej chemické a predovšetkým

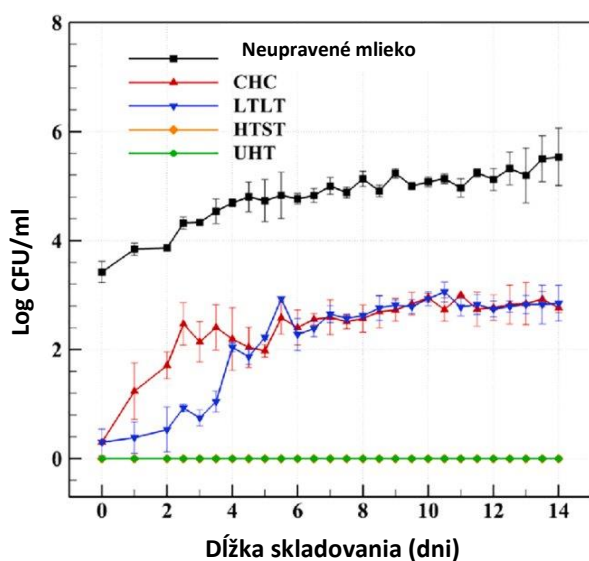
intenzívne mechanické účinky umožňujú efektívnu dezintegráciu materiálu, ako aj buniek mikróbov. Sterilizácia kvapalných potravín hydrodynamickou kavitáciou dokáže zachovávať ich vyššiu kvalitu pri menšej spotrebe energie, keďže prebieha pri nižších teplotách. Je všeobecne známe, že klasickou vysokoteplotnou sterilizáciou alebo pasterizáciou potraviny strácajú veľa prospešných zložiek. Medzi potraviny ktoré je možné takto spracovávať patria rôzne mliekarenské výrobky (mlieko, jogurty,...), ovocné/zeleninové džúsy alebo pyrė, dresingy, omáčky, alebo pivo [27],[32].

### Mliekarenstvo

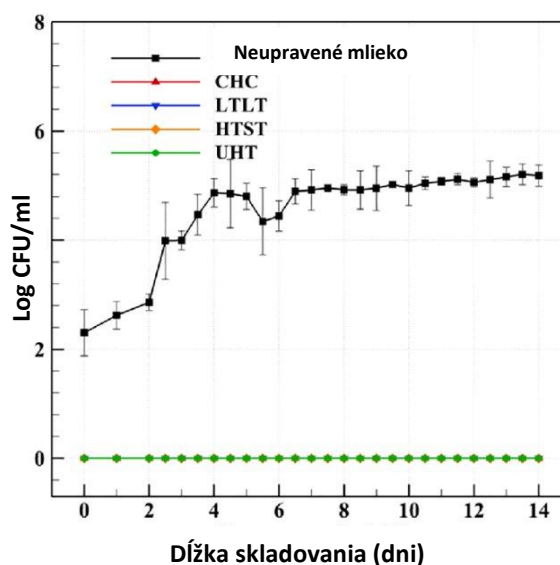
Mlieko je dostupným a všeobecne doporučovaným zdrojom vitamínov, prospešných minerálov a bielkovín. Kvôli neustále rastúcej populácii sa mliekarenský priemysel rapídne rozrastá, v roku 2018 mal celkový trh s mliekarenským tovarom hodnotu 673,8 miliardy amerických dolárov a do roku 2024 sa predpokladá, že táto hodnota prekročí bilión dolárov. Logicky sa preto zvyšujú nároky na kvalitu a trvanlivosť mliečnych produktov, a hľadajú sa lacnejšie a efektívnejšie spôsoby ako toho dosiahnuť [23].

Sterilizácia mlieka pomocou hydrodynamickej kavitácia je pomerne nová záležitosť. Použitím pokročilého hydrodynamického kavitačného reaktora sa môže dosiahnuť významnej redukcie patogénov, ako sú *Escherichia coli*, *Staphylococcus aerus* alebo *Bacillus cereus*, pri najvyššej teplote 70 °C. Oproti konvenčným metódam je táto značne rýchlejšia a aj keď rovnako ako ony nedokáže zlikvidovať všetky bakteriálne spóry (môžu spôsobiť otravu jedlom – hnačky a zvracanie; sú veľmi odolné), v kombinácii s okamžitým ochladením a správnym skladovaním vie zabrániť ich aktivácii [23].

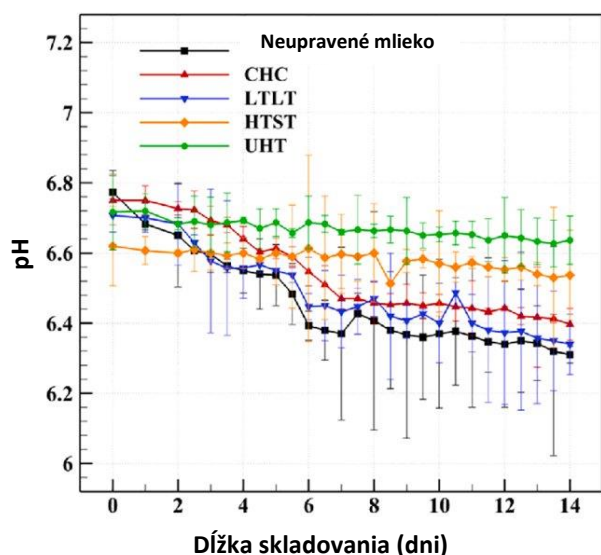
Na nasledujúcich obrázkoch je možné vidieť výsledky pokusu, v ktorom sa nechalo neupravené mlieko, mlieko sterilizované kontinuálnou hydrodynamickou kavitáciou (continuous hydrodynamic cavitation CHC) a mlieko sterilizované konvenčnými metódami – krátkodobou vysokoteplotnou úpravou (high-temperature short-time HTST), ultra-vysokoteplotnou úpravou (ultra-high temperature UHT) a dlhodobou nízkoteplotnou úpravou (long-time low-temperature LTLT) uskladnené po dobu 14 dní pri teplote 5°C.



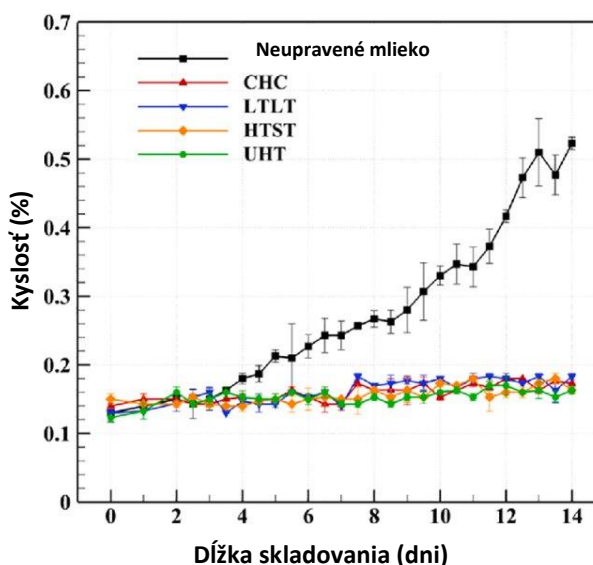
**Obr.28** Zmeny koncentrácie (colony-forming units CFU) baktérií [23]



**Obr.29** Zmeny koncentrácie baktérie *E. coli* [23]



Obr.30 Zmeny v pH mlieka [23]



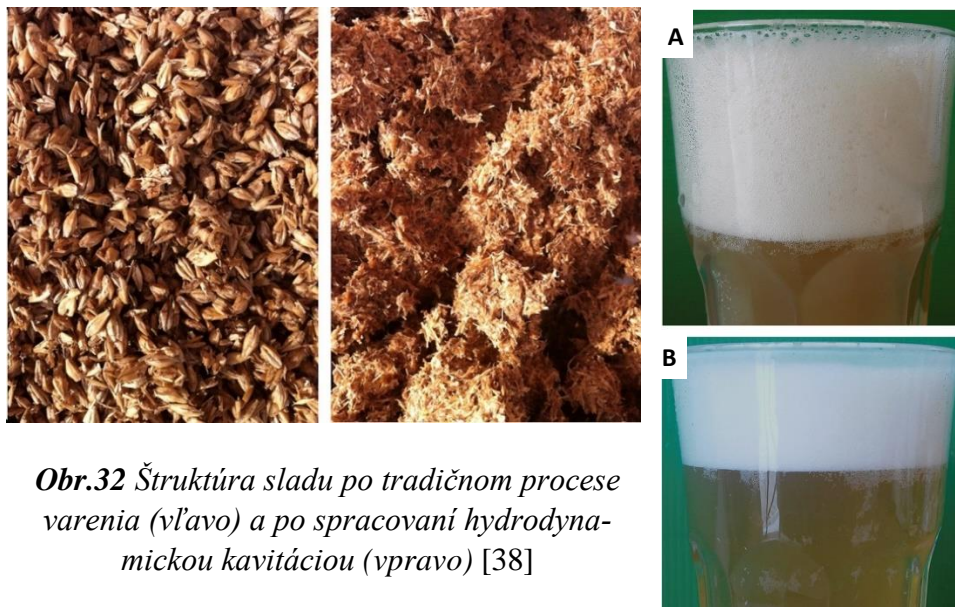
Obr.31 Zmeny v kyslosti mlieka [23]

Bezpečnosť, trvanlivosť a nutričné hodnoty kavitácie spracovaného mlieka sú teda vo veľkej miere porovnateľné s použitím konvenčných metód, a to všetko s výhodami popísanými vyššie. Podľa očakávaní by táto metóda mohla byť aplikovateľná aj pre ďalšie kvapalné potraviny. Pre vierohodnejšie výsledky je však do budúcnosti potrebný ďalší výskum [23].

Reaktory typu rotor-stator je v tomto prípade možné využiť aj ako efektívny nástroj modifikácie rozpustnosti mliečnych proteínov, rehydratácie mliečnych práškov, homogenizácie mlieka a zmeny viskozity. Pri vykonaní pokusu na proteíne MPC80 bol pozorovaný pokles viskozity na 56% pôvodnej hodnoty. Účinky hydrodynamickej kavitácie prekonal účinnosť tradičných fyzikálnych, chemických alebo enzymatických procesov. Pri rehydratácii 90 % mliečného prášku sa priemerná veľkosť častíc pohybovala okolo 0,45  $\mu\text{m}$ , pričom klasickým vysokostrižným miešaním to bolo až 21,17  $\mu\text{m}$ . Výsledkom je predĺženie trvanlivosti a výrazné zvýšenie kvality týchto produktov [27].

### Pivovarníctvo

Pivo je bezpochyby jedným z najpopulárnejších alkoholických nápojov na svete. Použitie reaktora s Venturiho trubicou sa ukazuje ako účinná inovatívna technológia pri viacerých fázach varenia piva. Reaktor je nenáročný na údržbu, šetrí energiu a možnosti jeho využitia sú skutočne pozoruhodné. Do výhod tejto technológie patrí napr. zlepšená extrakcia škrobu, enzymatická sacharifikácia a celkové zrýchlenie procesu. Použitím hydrodynamickej kavitácie je možné zabezpečiť mletie obilného sladu (obrázok č. 32), dezinfekciu vody a mladiny, miešanie vody so zrnami, rmutovanie a chmelenie. Je možné ju použiť aj na znižovanie obsahu lepku v pive (výroba bezlepkového piva (<20 mg/l) a piva s nízkym obsahom lepku (<100 mg/l) ) a spraviť ho tak prístupnejšie pre celiatikov. Kavitačné spracovanie vplyva pozitívne aj na stabilitu peny, čo je u spotrebiteľov jedna z kľúčových vlastností. Obrázok č. 33 ukazuje pokus porovnania stability pivnej peny v rôznych dobách od varenia – napriek miernej redukcii si aj 260 dní po varení pena udržuje prijateľnú stabilitu. Na rozdiel od ostatných varných technológií dokáže technológia na báze hydrodynamickej kavitácie zachovávať v pive prospešné bioaktívne látky, ktoré sa bežne v procese fermentácie vytratia [27], [38].



**Obr.32** Štruktúra sladu po tradičnom procese varenia (vľavo) a po spracovaní hydrodynamickou kavitáciou (vpravo) [38]

**Obr.33**  
Stabilita pívnej peny zistená vo výrobnom teste (A) 124 dní a (B) 260 dní po uvaření piva [38]

### Výroba ovocných a zeleninových džúsov

Deštruktívne účinky hydrodynamickej kavitácie nepochybne nájdú využitie pri spracovaní ovocia a zeleniny do nápojov alebo pyrė. Podobne ako pri mlieku a pive je možné džúsy homogénizovať pri zachovaní dôležitých bioaktívnych látok, uspokojujúc tak potreby náročnejších spotrebiteľov. Pri výskume [39] využitia reaktora s clonovou doskou pri spracovaní paradajkového džúsu bolo zistené, že kavitačne ošetrený džús vykazuje vyššiu stabilitu (až do dvoch týždňov) a menšiu náchylnosť na mikrobiologickú degradáciu. Zachovával sa obsah fenolových zlúčenín a lykopenú (antioxidant) ktoré by mohli pri konvenčnom tepelnom spracovaní degradovať.

### 3.2.8 ČISTENIE VODY

Oblasť čistenia vody je v súčasnosti pravdepodobne tou najskloňovanejšou, čo sa pokrokov v technológiách spojených s hydrodynamickou kavitáciou týka. Ich význam neustále narastá, keďže sa do vôd okrem klasického splaškového kalu dostáva čoraz viac znečisťujúcich zložiek, odolných voči konvenčným technológiám čistenia vody. Niektoré technológie schopné odstrániť tieto odolné zložky (membránové procesy) vyžadujú dodatočné úpravy alebo sú príliš drahé pre veľkoobjemové procesy (sonochemické, elektrochemické úpravy). Hydrodynamická kavitácia predstavuje v tejto veci opäť účinný, ekonomicky výhodný a ľahko škálovateľný nástroj [27].

Veľké množstvo štúdií preukázalo účinnosť tradičných hydrodynamických reaktorov (clonové dosky, Venturiho trubica) pri odstraňovaní odolných znečisťujúcich zložiek. Významnú zložku tvoria zvyšky liečiv, ktoré môžu ovplyvňovať genetický, imunitný ale aj hormonálny vývoj jedincov. Okrem klasických liečiv sa môže jednať aj o zvyšky antibiotík. Ich nevedomá konzumácia prostredníctvom pitnej vody môže viesť k budovaniu antibiotickej rezistencie baktérií. Kvôli vysokej odolnosti antibiotických zvyškov sa na ich odstraňovanie vyvíjajú pokročilé chemické metódy, avšak ako aj vo väčšine ostatných prípadov ich masívnemu využitiu bráni vysoká nákladovosť. Kombinácia hydrodynamickej kavitácie a chemických metód vykazuje dobré výsledky pri dezintegrácii ich zvyškov [40]. Ďalej sa môže jednať o priemyselné farbivá, hlavne z papieri a textilných tovární, ktoré môžu mať karcinogénne účinky. Do vody ktorú

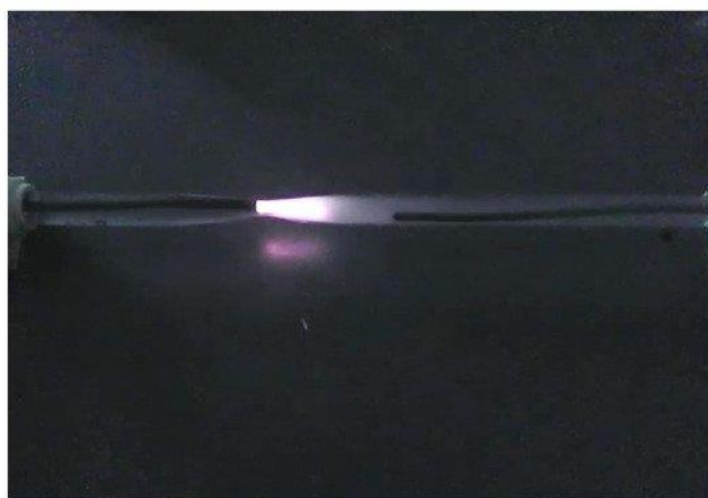
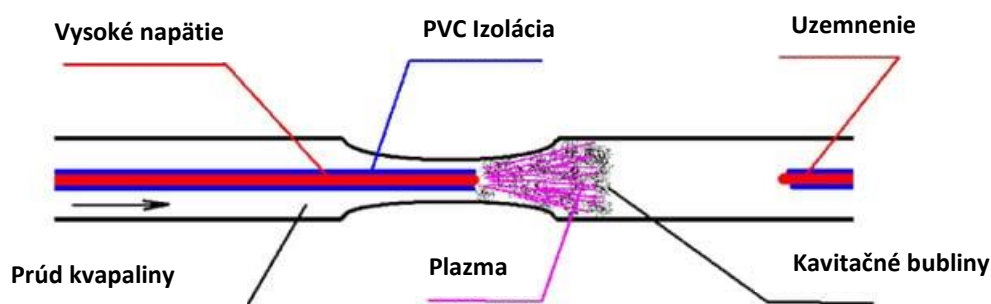


následne pijeme sa môžu dostávať aj poľnohospodárske pesticídy a insekticídy, obsahujúce ďalšie zdraviu škodiace látky, rovnako ako aj rôzne baktérie, vírusy, sinice a iné vodné mikroorganizmy. Najúčinnějšími prostriedkami ich likvidácie sa ukázali byť kombinované/hybridné metódy, čiže spojenie využitia tradičných hydrodynamických reaktorov s ďalšími pokročilými oxidačnými procesmi. To by mohlo naznačovať, že práve hybridné technológie na báze hydrodynamickej kavitácie by mohli byť kľúčom pre skutočne efektívne procesy čistenia vôd [27].

### **CaviPlasma**

Veľmi unikátne zameraná bola práca univerzít a výskumných inštitúcií z Brna. Výsledkom ich výskumu bolo spojenie hydrodynamickej kavitácie a studeného plazmového výboja, čím vznikla unikátna hybridná technológia, ktorá by mohla predstavovať vysoko účinný nástroj v boji s ďalšími ťažko odstrániteľnými zložkami, napr. vodnými riasami alebo sinicami (*Microcystis aeruginosa*) [41], [42]. Práve sinice spôsobujú významné zhoršovanie kvality vody a značne narúšajú využívanie vodných plôch na nielen technologické, ale aj rekreačné účely, pričom sa im darí čím ďalej tým viac. Z toho dôvodu je vývoj technológií na ich netoxickú likvidáciu čoraz väčšou nutnosťou [41].

Toto inovatívne zariadenie je zobrazené na nasledujúcich obrázkoch. Plazmový výboj je generovaný dvojicou medených drôtov izolovaných pomocou PVC, z ktorých jeden je pripojený na zdroj vysokého napätia a druhý slúži ako uzemnenie, umiestnených v kavitáčnej tryske. Mrak kavitáčnych bublín vytvorený pomocou zúženia (Venturi) slúži ako priestor pre plazmový výboj [41].



**Obr.34** Plazmový výboj generovaný v kavitačnom mraku + detail systému elektród [41]

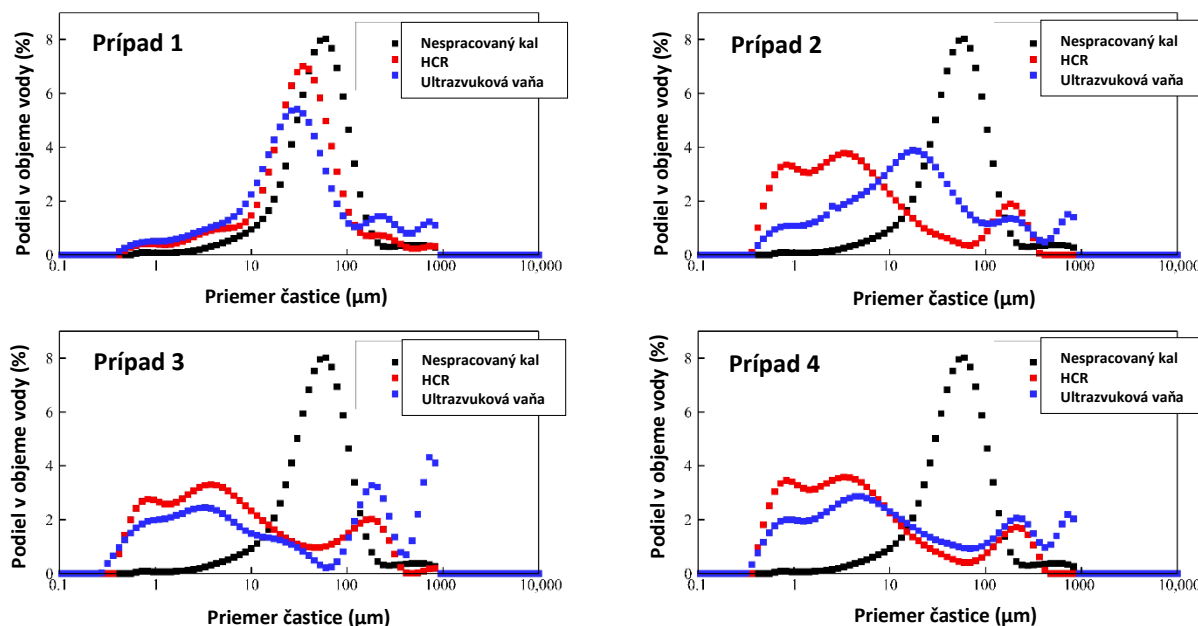
Pri experimente sa potvrdila vyššia efektívnosť kombinovanej technológie s plazmovým výbojom aj v porovnaní s klasickou hydrodynamickou kavitáciou. Kavitácia samotná bola schopná zničiť plynové vezikuly v bunkách siníc, čo umožnilo ich sedimentáciu a následné odstránenie z vody. Pôsobením plazmového výboja však bolo dosiahnuté zamedzenie fotosyntézy aj metabolickej aktivity buniek siníc, čo v podstate znamenalo ich usmrtenie. Všetko je to možné dosiahnuť bez deštrukcie bunkovej membrány, čo by spôsobilo únik nežiadúcich toxínov do vody. Táto kombinovaná technológia sa ukázala byť efektívna, ekonomicky výhodná, ekologická a schopná pracovať v kontinuálnom režime [41].

Veľmi mladú technológiu sa darí naďalej vylepšovať, prístroj laboratórnych rozmerov zvládne spracovať 0,55 m<sup>3</sup>/h, pričom technológia zvláda likvidovať sinice už behom jedného cyklu (13 s). Zariadenie vykazuje vysoký potenciál v kontexte priemyselného uplatnenia, a vzhľadom na jeho výsledky a efektívnosť sa dá očakávať širšie spektrum aplikácií tejto kombinovanej metódy. Okrem rias a siníc to môžu byť ďalšie odolné znečisťujúce zložky, ako napr. ďalšie formy patogénov alebo zvyšky liečiv či hormónov (estrogén z antikoncepcie) [42].

### **ARHCR**

Okrem hybridných technológií vykazujú výborné výsledky aj pokročilé typy reaktorov. Štúdiám zameraných na použitie pokročilých rotor-statorových reaktorov sa v poslednej dobe intenzívne venujú vedci z Shandong University v Číne a Hanyang University v Kórejskej republike. Výskumy sú zamerané na využitie týchto inovatívnych reaktorov na likvidovanie potenciálnych patogénov a odstraňovanie splaškového kalu z vody, ako aj dezinfekciu potravín (viz. 3.2.7).

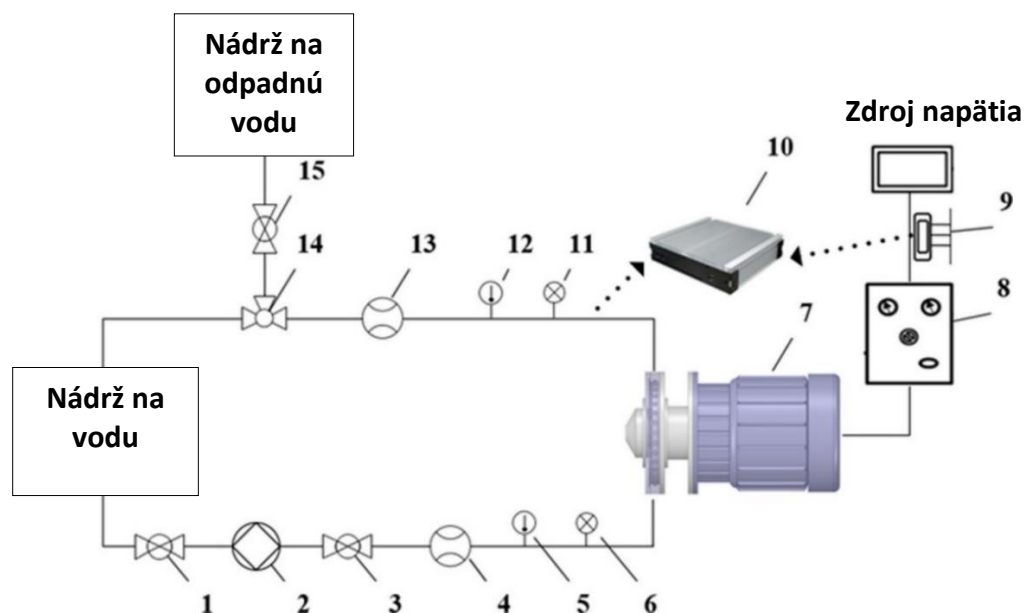
Štúdia [43] zameraná na spracovávanie splaškového kalu sa zaoberala porovnaním účinností nového rotor-statorového reaktora a ultrazvukovej vane. V súčasnosti sa na čistenie odpadných vôd používa biologická metóda s využitím aktivovaného kalu, ktorej výsledkom je však veľké množstvo prebytočného kalu, čo zaťažuje 18 až 57% prevádzkových nákladov čistiarní odpadových vôd. Na redukciiu tohto kalu bolo už aplikovaný veľa metód, ktoré sa však nepreukázali byť dostatočne účinné a rentabilné. V experimente zobrazenom na obrázku č. 35 sú zobrazené 4 prípady úpravy splaškového kalu, pričom prvý prípad trval najkratšie pri najnižšom energetickom vstupe (26 min a 15 s; 84,53 kJ/kg kalu) a štvrtý najdlhšie pri najvyššom energetickom vstupe (1 h 42 min 25 s; 329,8 kJ/kg kalu).



**Obr.35** Distribúcia veľkosti častíc splaškového kalu v rôznych prípadoch experimentu [43]

Ako je možné si všimnúť z grafov, obomi metódami sa darí účinne rozkladať častice splaškového kalu. Pri kratšej nízkoenergetickej úprave (Prípady 1) boli častice menšie v prípade použitia ultrazvukovej vane. V ostatných prípadoch má už navrch použitie hydrodynamického reaktora, kde väčšina častíc kalu dosahuje veľkosť 10 µm a menšiu. Po desiatich cykloch sa zistilo, že v prípade použitia rotor-statorového reaktora sa stredná veľkosť častíc znížila o 92,7%, pričom v prípade ultrazvukovej vane to bolo 67,6 %. Verzia s použitím hydrodynamického reaktora typu rotor-stator sa ukázala ako vhodná a zároveň účinnejšia. Hydrodynamický reaktor vykázal lepší oxidačný výkon a kal rozkladal rovnomernejšie [43].

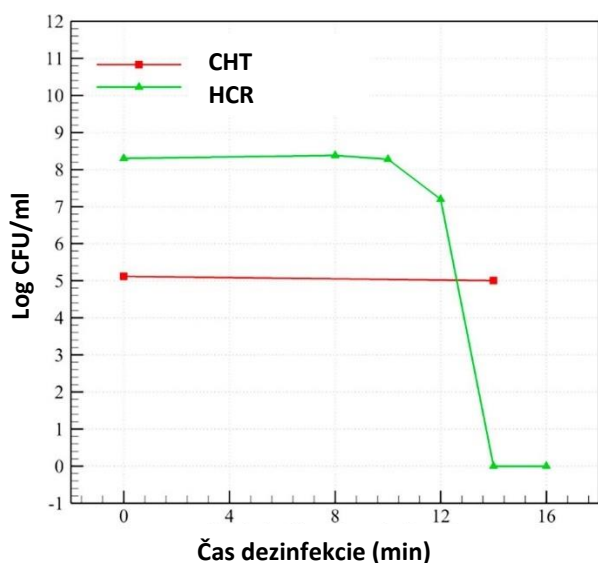
Ďalšie štúdie [22], [44] sa zameriavali na posúdenie účinnosti použitia nového rotor-statorového reaktora na dezinfekciu vody, kde bola zohľadňovaným ukazovateľom koncentrácia baktérie E. coli. Na obrázku č. 36 je znázornené schéma použitej experimentálnej trate.



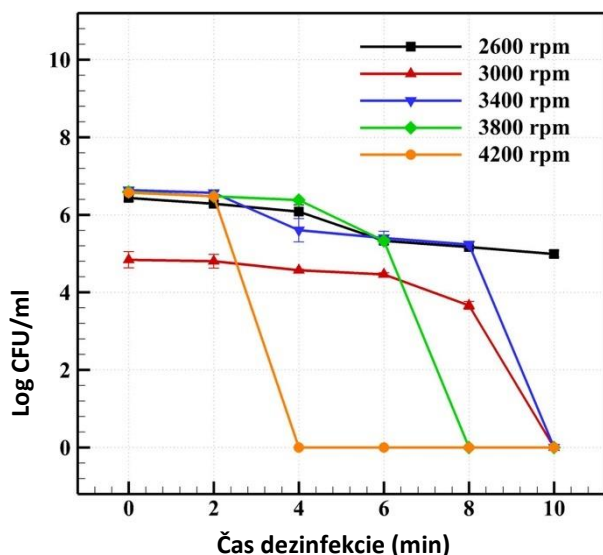
**Obr.36** Schematické znázornenie experimentálnej trate s pokročilým rotačným hydrodynamickým kavitačným reaktorom [44]

1,15 - guľové ventily, 2 - prúdové čerpadlo, 3 – PID regulačný ventil, 4,13 - elektromagnetické prietokomery, 5,12 - teplotné senzory, 6,11 tlakové senzory, 7 – reaktor s elektromotorom, 8 – kontrolná skrinka a frekvenčný transformátor, 9 – merač výkonu, 10 – priemyselný počítač, 14 – T ventil

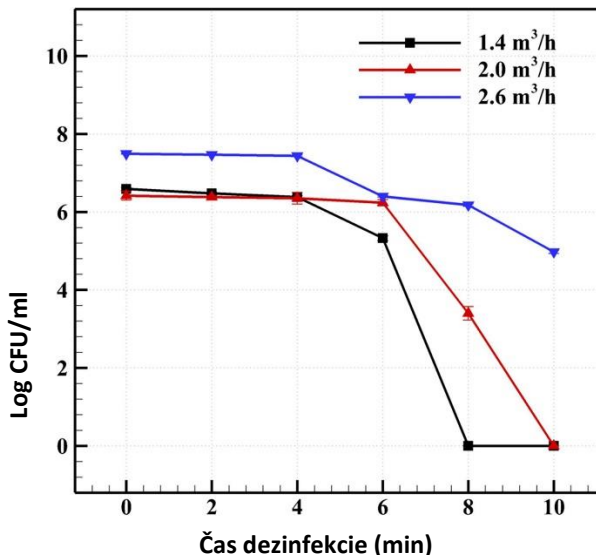
Na nasledujúcich obrázkoch je zobrazené porovnanie použitia hydrodynamického kavitačného reaktora (HCR) s konvenčnou tepelnou úpravou (conventional heat treatment CHT), ako aj vplyv otáčok reaktora a veľkosti prietoku na koncentráciu E. coli vo vode.



**Obr.37** Zmeny v koncentrácii E. coli pri dezinfekcii konvenčnou tepelnou úpravou a hydrodynamickým kavitačným reaktorom [22]



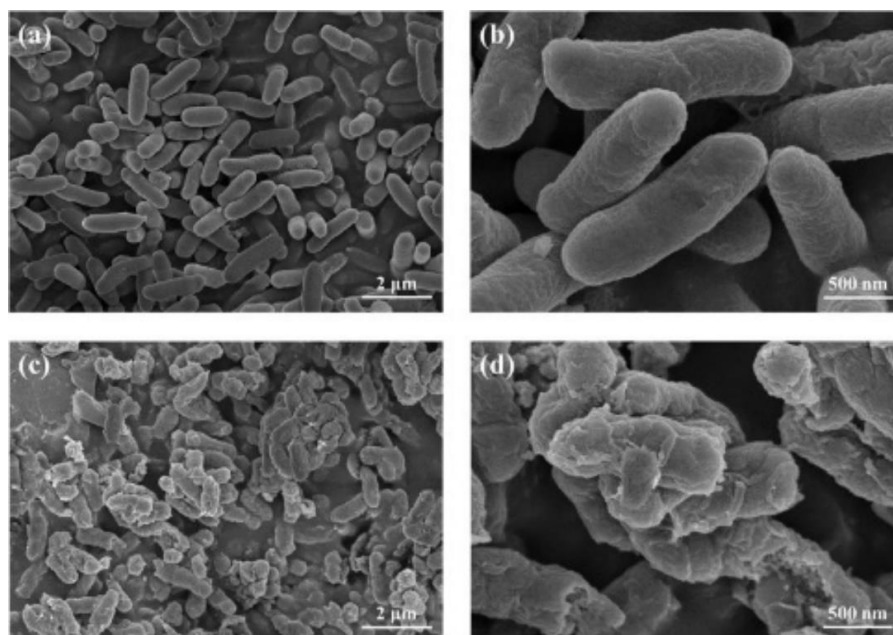
**Obr.38** Vplyv otáčok na likvidáciu E. coli pri prietoku 1,4 m<sup>3</sup>/h [44]



**Obr.39** Vplyv prietoku na likvidáciu E. coli pri otáčkach 3800 min<sup>-1</sup> [44]

Ako je možné si všimnúť, použitím pokročilých rotor-statorových reaktorov sa dokáže eliminovať až 100% baktérií *E. coli* obsiahnutých vo vode, pričom podobné výsledky sa dajú očakávať aj pri eliminácii ďalších patogénov. Bolo taktiež zistené, že zásadný vplyv na dezinfekciu má aj teplota počas prevádzky [22]. Najlepšie výsledky dezinfekcie boli zaznamenané pri najvyšších otáčkach a nízkych prietokoch. Na rozdiel od klasických hydrodynamických reaktorov môžu byť v tých pokročilých vyvolávané aj sonochemické účinky, zlepšujú tak ich celkovú účinnosť [44]. Ukazujú sa ako ekonomicky výhodnejšie aj v porovnaní s klasickými typmi hydrodynamických reaktorov, a zväčšovaním ich rozmerov sa môžu tieto výhody preukázať ešte výraznejšie [22].

Vplyv hydrodynamickej kavitácie generovanej v pokročilom rotor-statorovom reaktore na morfológiu baktérie *E. coli* je dobre znázornený na obrázku č. 40, nadobudnutým pomocou elektrónovej mikroskopie. Snímky (a) a (b) zobrazujú neporušený tvar baktérie *E. coli*. Na snímkach (c) a (d) je možné vidieť výsledok po desiatich minútach úpravy vody v reaktore s otáčkami  $3800 \text{ min}^{-1}$  a prietoku  $1,4 \text{ m}^3/\text{h}$ . Výsledkom boli popraskané bunkové membrány a únik cytoplazmy, pričom niektoré baktérie boli v strede rozpolené [44].



**Obr.40** Snímky buniek baktérie *E. coli* z elektrónového mikroskopu [44]

## ZÁVER

Práca začína stručným teoretickým úvodom do problematiky kavitácie. Popísaný je princíp kavitačného javu a následne je priestor venovaný aj princípu kavitačnej erózie, ako aj spôsobom jej detekcie a prevencie. Tieto negatívne účinky kavitácie slúžia ako potrebný protiklad pri posudzovaní možností jej technologického využitia.

Druhá kapitola sa zameriava na opis problematiky využitia kavitácie v priemyselných procesoch. Hneď v úvode sú predstavené a porovnané aplikačne najvýznamnejšie typy kavitácie – akustická a hydrodynamická. Účinky akustickej kavitácie, vyvolanej vplyvom ultrazvukových vln, sa na prvý pohľad zdajú byť veľmi sľubné a ich rozsiahla aplikačná oblasť je pôsobivá. Povaha akustickej kavitácie však zabráňuje plnému využitiu tohto typu vo väčšine potenciálnych procesov, keď sa uvažuje o rozmeroch priemyselného využitia. K jej generovaniu dochádza v tzv. sonochemických reaktoroch, ktoré na vytváranie ultrazvukových vln používajú prevodníky energie. Ich výhodou je schopnosť pomerne ľahko generovať kavitáciu o vysokej intenzite v požadovaných miestach, avšak nie sú schopné takto vytvorenú energiu prenášať na väčšie vzdialenosti, čo znamená že ich kapacita je pomerne obmedzená. V súčasnom stave poznania sa teda s masívnym priemyselným využitím technológií na báze akustickej kavitácie veľmi neráta, keďže snaha o zväčšenie kapacít sonochemických reaktorov je spojená okrem konštrukčných problémov aj s vysokými nákladmi. Svetlé výnimky predstavujú procesy tvorby a homogenizácie emulzií, prípadne extrakčné procesy. Pôsobením ultrazvuku je možné vyrábať emulzie bez použitia emulgátorov, čo má priaznivý vplyv na ich kvalitu. V týchto oblastiach sa pravdepodobne ďalší výskum oplatí. Na druhú stranu, technológie na báze hydrodynamickej kavitácie predstavujú oveľa ľahšie škálovateľnú, energeticky výhodnejšiu a vo väčšine prípadov aj účinnejšiu variantu. Vykazujú výbornú variabilitu, keďže hydrodynamické reaktory je ľahké prevádzkovo aj geometricky modifikovať pre dosiahnutie želaného účinku. V možnostiach ich využitia nastal v posledných rokoch výrazný posun. Vo vybraných priemyselných procesoch však kavitačné technológie všeobecne predstavujú výhodnejšiu alternatívu voči konvenčným technológiám. Medzi ich základné výhody patrí, bez ohľadu na konkrétny proces, vyššia účinnosť, urýchlenie celého procesu, nižšie prevádzkové náklady a dosahovanie kvalitnejších výsledkov, pričom predstavujú žiadnu alebo minimálnu záťaž pre životné prostredie.

Tretia kapitola podrobnejšie rozoberá hydrodynamickú kavitáciu a najnovšie zistenia v možnostiach jej uplatnenia. V úvode je popísané ako dochádza k jej vzniku a akú úlohu zohráva  $C_v$ . Všetky uvedené štúdie potvrdzujú výhody hydrodynamickej kavitácie nad konvenčnými metódami ako aj akustickou kavitáciou. Technológie na báze hydrodynamickej kavitácie majú ohromný potenciál byť vysokoúčinným nástrojom v ekologickom hospodárstve. Jednoduchá konštrukcia hydrodynamických kavitačných reaktorov, ich dobrá škálovateľnosť, variabilita a ekonomická prevádzka spolu s výbornými výsledkami ich predurčujú k priemyselnému uplatneniu. Môžu nájsť uplatnenie napr. pri ekologickejšej syntéze materiálov, výrobe celulózy, odstraňovaní nečistôt z fosílnych palív, extrahovaní zdraviu prospešných látok, výrobe biopalív, kvalitnejších emulzií, alkoholických aj nealkoholických nápojov alebo pri dezinfekcii potravín či efektívnom čistení vôd. Pozoruhodnú a inovatívnu podoblasť predstavujú hybridné technológie, kombinujúce hydrodynamickú kavitáciu s ďalšími metódami (napr. spomínaná CaviPlasma), ktoré vykazujú výborné výsledky pri likvidácii vysoko odolných znečisťujúcich zložiek (baktérie, vírusy, sinice, antibiotiká, hormóny,...) vyskytujúcich sa vo vode.

Na inak výborné čísla týkajúce sa účinnosti a prevádzkových nákladov kavitačných technológií je však predsa len nutné nazerať s istou dávkou skepticizmu. Dosiahnuté hodnoty boli výsledkami prevažne laboratórnych štúdií, a tie sa nemusia vždy presne odzrkadliť aj v komerčnej sfére. Dá sa preto očakávať aj tá možnosť, že pri priemyselnej prevádzke bude účinnosť kavitačných reaktorov o niečo menšia a náklady na prevádzku vyššie. Jedná sa predovšetkým o technológie na báze hydrodynamickej kavitácie, keďže sú skúmané kratšiu dobu a zároveň ešte neprekonali pomyselnú hranicu masívneho priemyselného využitia. Keď sa tak stane, bude potrebný ďalší výskum zameraný na účinnosť hydrodynamických kavitačných reaktorov, ich rentabilitu a ich životnosť, ktorú je možné naozaj spoľahlivo overiť až pri komerčnej prevádzke. Životnosť reaktorov bude vzhľadom na deštruktívne účinky kavitácie nepochybne silne zohľadňovaným faktorom. Práve preto bude nutná detailná ekonomická analýza ich prevádzky. Dá sa však očakávať, že výhody používania hydrodynamickej kavitácie prevýšia fakt, že sa časti reaktorov budú poškodzovať a bude ich nutné po určitých časových intervaloch vymieňať.

Kavitačné reaktory majú ešte nepochybne priestor na vylepšovanie a vývoj (napr. minimalizovanie ich opotrebenia). Veľký potenciál ukazujú pokročilé typy rotačných hydrodynamických kavitačných reaktorov, ktoré už boli odskúšané napr. pri dezinfekcii mlieka a čistení vody.

Pasáž s využitím kavitácie pre účely čistenia vody si jednoznačne zaslúži rozsiahlejší a podrobnejší opis, keďže sa jedná o veľmi obširnu a aktuálnu tému.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990.
- [2] Cavitation. In: *Britannica* [online]. 2018 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/cavitation>
- [3] Hydrodynamic cavitation and its application in the fuel industry. In: *Globe-Core* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://globecore.co.za/hydrodynamic-cavitation-and-its-application-in-the-fuel-industry/>
- [4] HOMA, Dorota. Cavitation phenomenon research for different flow conditions. *World Scientific News*. 2017, 73, 1-11. Dostupné z: <http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2017/05/WSN-73-2017-1-11.pdf>
- [5] SUN, Xun, Jingting LIU, Li JI, Guichao WANG, Shan ZHAO, Joon-Yong YOON a Songying CHEN. A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge. *Science of The Total Environment*. 2020,737, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139606. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720331260>
- [6] BRDIČKA, Miroslav, Oldřich TARABA a Ladislav SAMEK. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Technická knihovna inženýra.
- [7] Cavitation Explained and Illustrated. In: *Machinery Lubrication* [online]. 2002 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z : <https://www.machinerylubrication.com/Read/380/cavitation-wear-hydraulic>
- [8] Coatings Can Improve Pump Impeller Cavitation Damage Resistance. In: *WaterWorld* [online]. 2012 [2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.waterworld.com/home/article/16193142/coatings-can-improve-pump-impeller-cavitation-damage-resistance>
- [9] Cavitation Erosion Testing. In: *Hielscher Ultrasound Technology* [online]. [2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.hielscher.com/cavitation-erosion-testing.htm>
- [10] Material Erosion Testing. In: *DYNAFLOW, INC.* [online]. [2021-03-05]. Dostupné z: <http://www.dynaflo.com/Services/Cavitation-Erosion-Testing.htm>
- [11] Cavitation Test. In: *SVA Potsdam* [online]. 2015 [2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.sva-potsdam.de/en/cavitation-test/>
- [12] CT Systems [online]. [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://ctsystems.ua/>
- [13] GOGATE, Parag R. a Abhijeet M. KABADI. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*. 2009, 44, 60-72, DOI: 10.1016/j.bej.2008.10.006. ISSN 1369-703X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X08003392>
- [14] SUSLICK, S., Yuri DIDENKO, Ming FANG, Taeghwan HYEON, Kenneth KOLBECK, William III, Millan MDLELENI a Mike WONG. Acoustic Cavitation and Its Chemical Consequences. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1999, 357(1751), 335-353, DOI: 10.1098/rsta.1999.0330. ISSN 1364-503X. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1999.0330>



- [15] GOGATE, Parag R., R.K. TAYAL a Aniruddha PANDIT. Cavitation: A technology on the horizon. *Current Science*. 2006, 91, 35-46. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/279898046\\_Cavitation\\_A\\_technology\\_on\\_the\\_horizon](https://www.researchgate.net/publication/279898046_Cavitation_A_technology_on_the_horizon)
- [16] GOGATE, Parag R. Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes. *Advances in Environmental Research*. 2002, 6, 335-358, DOI: 10.1016/S1093-0191(01)00067-3. ISSN 1093-0191. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1093019101000673#BIB17>
- [17] SAVE, S.S., A.B. PANDIT a J.B: JOSHI. Microbial cell disruption: role of cavitation. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*. 1994, 55(3), B67-B72, DOI: 10.1016/0923-0467(94)06062-2. ISSN 0923-0467. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0923046794060622>
- [18] MICHEL, Frederick a Oleg KOZYUK. Hydrodynamic cavitation processing. In: *Chemical processes for a Sustainable Future*, 1. vyd. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2015, kapitola 5, 84-142. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/270903970\\_Hydrodynamic\\_Cavitation\\_Processing#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/270903970_Hydrodynamic_Cavitation_Processing#fullTextFileContent)
- [19] SUN, Xun, Songying CHEN, Jingting LIU, Shan ZHAO a Joon Yong YOON. Hydrodynamic Cavitation: A Promising Technology for Industrial-Scale Synthesis of Nanomaterials. *Frontiers in Chemistry*. 2020, 8, 1-7, DOI: 10.3389/fchem.2020.00259. ISSN 2296-2646. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2020.00259/full#B39>
- [20] PANDA, Debabrata a Sivakumar MANICKAM. Cavitation Technology—The Future of Greener Extraction Method: A Review on the Extraction of Natural Products and Process Intensification Mechanism and Perspectives. *Applied Sciences*. 2019, 9(4), 1-21. DOI: 10.3390/app9040766. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/766/htm#>
- [21] WU, Zhilin, Silvia TAGLIAPIETRA, Alessandro GIRAUDO, Katia MATRINA a Giancarlo CRAVOTTO. Harnessing cavitation effects for green process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019, 52, 530-546, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.032. ISSN 1350-4177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417718312951?via%3Dihub#f0005>
- [22] SUN, Xun, Jong Jin PARK, Hyun Soo KIM, Seung Ho LEE, Si Jin SEONG, Ae Son OM a Joon Yong YOON. Experimental investigation of the thermal and disinfection performances of a novel hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018, 49, 13-23, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.02.039. ISSN 1350-4177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417718303006?via%3Dihub>
- [23] SUN, Xun, Xiaoxu XUAN, Li JI, Songying CHEN, Jingting LIU, Shan ZHAO, Seulgi PARK, Joon Yong YOON a Ae Son OM. A novel continuous hydrodynamic cavitation technology for the inactivation of pathogens in milk. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021, 71, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105382. ISSN 1350-4177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417720316862?via%3Dihub>
- [24] JOHANSSON, Örjan, Taraka PAMIDI a Vijay SHANKAR. Extraction of tungsten from scheelite using hydrodynamic and acoustic cavitation.

- Ultrasonics Sonochemistry*. 2021, 71, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105408. ISSN 1350-4177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ez-proxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1350417720317120>
- [25] SURYAWANSHI, Naline B., Vinay M. BHANDARI, Laxmi Gayatri SOROKHAIBAM a Vivek V. RANADE. Developing techno-economically sustainable methodologies for deep desulfurization using hydrodynamic cavitation. *Fuel*. 2017, 210, 482-490, DOI: 10.1016/j.fuel.2017.08.106. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ez-proxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0016236117310992>
- [26] AVVARU, Balasubrahmanyam, Natarajan VENKATESWARAN, Parasuveera UPPARA, Suresh B. IYENGAR a Sanjeev S. KATTI. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018, 42, 493-507, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.12.010. ISSN 1350-4177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417717305771>
- [27] PANDA, Debabrata, Virendra Kumar SAHARAN a Sivakumar MANICKAM. Controlled Hydrodynamic Cavitation: A Review of Recent Advances and Perspectives for Greener Processing. *Processes*. 2020, 8(2), 1-31, DOI: 10.3390/pr8020220. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/2/220/htm#B36-processes-08-00220>
- [28] JYOTI, K.K. a A.B. Pandit. Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*. 2001, 7(3), 201-212, DOI: 10.1016/S1369-703X(00)00128-5. ISSN 1369-703X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X00001285>
- [29] BARANOVA, M.P. Hydrodynamic cavitation unit for improving the performance of irrigation water during plant growing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, 315, DOI: 10.1088/1755-1315/315/6/062018. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/315/6/062018>
- [30] The Benefits of Ultrasonic Cleaning. In: *Infection Control Today* [online] 2001 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.infectioncontrolday.com/view/benefits-ultrasonic-cleaning>
- [31] RUDOLF, Pavel. Prednášky k predmetu: Hydromechanika (5HY). Brno: Vysoké učení technické, 2021
- [32] MAHANTI, Naveen Kumar, Subir CHAKRABORTY, S. Shiva SHANKAR a Ajay YADAV. Hydrodynamic Cavitation Technology for Food Processing and Preservation. In: *Emerging Thermal and Nonthermal Technologies in Food Processing*, 1. vyd. Apple Academic Press, 2020, kapitola 8, 199-224. DOI: 10.1201/9780429297335-8. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/341191782\\_Hydrodynamic\\_Cavitation\\_Technology\\_for\\_Food\\_Processing\\_and\\_Preservation](https://www.researchgate.net/publication/341191782_Hydrodynamic_Cavitation_Technology_for_Food_Processing_and_Preservation)
- [33] ZHANG, Zhiliang, Guangquan WANG, Yong NIE a Jianbing JI. Hydrodynamic cavitation as an efficient method for the formation of sub-100nm O/W emulsions with high stability. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, 24(10), 1477-1480, DOI: 10.1016/j.cjche.2016.04.011. ISSN 1004-9541. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1004954116302853?via%3Dihub#f0040>
- [34] SCURRIA, Antonio, Lorenzo ALBANESE, Mario PAGLIARO, Federica ZABINI, Francesco GIORDANO, Francesco MENEGUZZO a Rosaria CIRIMINNA. CytoCell: Valued Cellulose from Citrus Processing Waste.

- Molecules*. 2021, 26(3), 596, DOI: 10.3390/molecules26030596. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/3/596/htm>
- [35] MENEGUZZO, Francesco, Rosaria CIRIMINNA, Federica FABINI a Mario PAGLIARO. Review of Evidence Available on Hesperidin-Rich Products as Potential Tools against COVID-19 and Hydrodynamic Cavitation-Based Extraction as a Method of Increasing Their Production. *Processes* 2020, 8(5), 549, DOI: 10.3390/pr8050549. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/5/549/htm>
- [36] GHAYAL, Dyneshwar, Aniruddha B. PANDIT a Virendra K. RATHOD. Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2013, 20(1), 322-328, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.07.009. ISSN 1350-4177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417712001484>
- [37] INNOCENZI, Valentina a Marina PRISCIANDARO. Technical feasibility of biodiesel production from virgin oil and waste cooking oil: Comparison between traditional and innovative process based on hydrodynamic cavitation. *Waste Management*. 2021, 122, 15-25, DOI: 10.1016/j.wasman.2020.12.034. ISSN 0956-053X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20307303>
- [38] ALBANESE, Lorenzo, Rosaria CIRIMINNA, Francesco MENEGUZZO a Mario PAGLIARO. Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: Theory and real-scale experiments. *Journal of Cleaner Production*. 2017, 142(4), 1457-1470, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.162. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616320248>
- [39] HILARES, Ruly Terán, Joana Gonçalves dos SANTOS, Nicole Bacic SHIGUEMATSU, Muhammad Ajaz AHMED, Silvio Silvério da SILVA a Júlio César SANTOS. Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019, 54, 192-197, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.01.039. ISSN 1350-4177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417718315529>
- [40] CALCIO GAUDINO, Emanuela, Erica CANOVA, Pengyun LIU, Zhilin WU a Giancarlo CRAVOTTO. Degradation of Antibiotics in Wastewater: New Advances in Cavitation Treatments. *Molecules*. 2021, 26(3), 617, DOI: 10.3390/molecules26030617. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/3/617/htm>
- [41] MARŠÁLEK, Blahoslav, Eliška MARŠÁLKOVÁ, Klára ODEHNALOVÁ, František POCHYLÝ, Pavel RUDOLF, Pavel ŠTAHEL, Jozef RÁHEL, Jan ČECH, Simona FIALOVÁ a Štěpán ZEZULKA. Removal of *Microcystis aeruginosa* through the Combined Effect of Plasma Discharge and Hydrodynamic Cavitation. *Water*. 2020, 12(1), 8, DOI: 10.3390/w12010008. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/1/8/htm>
- [42] ČECH, Jan, Pavel ŠTAHEL, Jozef RÁHEL, Lubomír PROKEŠ, Pavel RUDOLF, Eliška MARŠÁLKOVÁ a Blahoslav MARŠÁLEK. Mass Production of Plasma Activated Water: Case Studies of Its Biocidal Effect on Algae and Cyanobacteria. *Water*. 2020, 12(11), 3167, DOI: 10.3390/w12113167. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/11/3167/htm>
- [43] KIM, Hyunsoo, Xun SUN, Yoon BONCHAN a Joon Yong YOON. Experimental Investigation of Sludge Treatment Using a Rotor-Stator Type

- Hydrodynamic Cavitation Reactor and an Ultrasonic Bath. *Processes*. 2019, 7(11), 790, DOI: 10.3390/pr7110790. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/11/790/htm>
- [44] SUN, Xun, Zhengquan WANG, Xiaoxu XUAN, Li JI, Xuewen LI, Yang TAO, Grzegorz BOCZKAJ, Shan ZHAO, Joon Yong YOON a Songying CHEN. Disinfection characteristics of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor in pilot scale. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021, 73, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105543. ISSN 1350-4177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417721000857>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Jednotka	Definícia
<b>Q</b>	m <sup>3</sup> /s	Objemový prietok
<b>S</b>	m <sup>2</sup>	Plocha prierezu trubice
<b>p</b>	Pa	Tlak v trubici
<b>p<sub>v</sub></b>	Pa	Tlak sýtych pár
<b>p<sub>2</sub></b>	Pa	Výstupný tlak
<b>v</b>	m/s	Rýchlosť kvapaliny
<b>v<sub>0</sub></b>	m/s	Priemerná rýchlosť kvapaliny v zúžení
<b>v<sub>min</sub></b>	m/s	Kritická kavitačná rýchlosť
<b>ρ</b>	m <sup>3</sup> /kg	Hustota kvapaliny
<b>g</b>	m/s <sup>2</sup>	Gravitačné zrýchlenie
<b>h</b>	m	Poloha prúdnice v gravitačnom poli
<b>C<sub>v</sub></b>	-	Kavitačné číslo

Skratka	Význam
HC	Hydrodynamická kavitácia (Hydrodynamic cavitation)
HCR	Hydrodynamický kavitačný reaktor (Hydrodynamic cavitation reactor)
ARHCR	Pokročilý rotačný hydrodynamický kavitačný reaktor (Advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor)
UAE	Ultrazvuková extrakcia (Ultrasound-assisted extraction)
NPC	Podtlaková kavitácia (Negative pressure cavitation)
CD	Clonová doska
VU	Vírový usmerňovač
CHC	Kontinuálna hydrodynamická kavitácia (Continuous hydrodynamic cavitation)
HTST	Krátkodobá vysokoteplotná úprava (High-temperature short-time)
UHT	Ultra-vysokoteplotná úprava (Ultra-high temperature)
LTLT	Dlhodobá nízkoteplotná úprava (Low-temperature long-time)
CFU	Koncentrácia baktérií (Colony forming units)
CHT	Konvenčná tepelná úprava (Conventional heat treatment)
PVC	Polyvinylchlorid