VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TRANSPARENTNÍ PACKING PRO OPTICKÉ EXPERIMENTY V ROTAČNÍM ABSORBÉRU

TRANSPARENT PACKING FOR OPTICAL EXPERIMENTS IN ROTATING PACKED BEDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Jiří Hájek

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Milan Malý, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Bc. Jiří Hájek**
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Milan Malý, Ph.D.**
Akademický rok:	2022/23

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 diplomové práce:

Transparentní packing pro optické experimenty v rotačním absorbéru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Absorpce CO2 z procesních plynů v cementárnách a ocelárnách nebo elektrárnách je jednou z možných cest k dosažení uhlíkové neutrality. Pro efektivní zachycení CO2 je nutné intenzifikovat celý proces, k čemu lze využít rotační absorbér (RPB), ve kterém dochází k absorpci CO2 do kapaliny. Pochopení fyziky proudění kapaliny uvnitř packingu RPB je klíčové pro návrh celého zařízení. Práce se bude zabývat návrhem, konstrukcí a ověřením funkčnosti transparentního packingu pro RPB, který umožní výzkum proudění kapalin optickými metodami. Dále bude proveden experiment s vysokorychlostní kamerou s cílem vizualizovat proudové struktury uvnitř packingu pro různé provozní režimy RPB.

Cíle diplomové práce:

1) Analýza publikovaných technických řešení laboratorních a reálných RPB se zaměřením na transparentní konstrukce.
2) Návrh a ověření konceptu transparentního packingu umožňující optické experimenty pomocí vysokorychlostní kamery.
3) Příprava modelu a výroba transparentního packingu pro laboratorní RPB.
4) Úprava stavícího RPB pro umožnění optických experimentů.
5) Experiment pomocí vysokorychlostní kamery s transparentní packingem na několika provozních režimech.
6) Vyhodnocení a diskuze předběžných výsledků a posouzení limitací navrženého designu packingu.

Seznam doporučené literatury:

RAO, D. P., BHOWAL, A., and GOSWAMI, P. S. “Process Intensification in Rotating Packed Beds (HIGEE): An Appraisal”, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 43, no. 4, pp. 1150-1162, Feb. 2004.

CHANDRA, A., GOSWAMI, P. S. and RAO, D. P. “Characteristics of Flow in a Rotating Packed Bed (HIGEE) with Split Packing”, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 44, no. 11, pp. 4051-4060, May 2005.

BURNS, J. R. and RAMSHAW, C. “Process intensification: Visual study of liquid maldistribution in rotating packed beds”, Chemical Engineering Science, vol. 51, no. 8, pp. 1347-1352, 1996.

Y. LIU, W. WU, Y. LUO, G. CHU, H. ZOU, J. CHEN, Visual study of fluid flow in rotating packed bed reactors, CIESC Journal, vol. 70, no. 10, pp. 3663-3676, 2019.

GAO, X. Y., CHU, G. W., OUYANG, Y., ZOU, H. K., LUO, Y., XIANG, Y. and Chen, J. F. “Gas Flow Characteristics in a Rotating Packed Bed by Particle Image Velocimetry Measurement”, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 56, no. 48, pp. 14350-14361, Dec. 2017.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Vzhledem k množství energetických a průmyslových procesů, které produkují oxid uhličitý, je nutné redukovat vypouštěné množství CO_2 do atmosféry. Jednou z možností je zachycení a uskladnění vyprodukovaného oxidu uhličitého tzv. CCS (z anglického *„Carbon Capture and Storage“*). Pro efektivní zachycení může být použit absorbér s rotujícím ložem (packingem), který funguje na podobném principu jako statická absorpční kolona, ovšem hnací silou kapaliny není tíhová, ale odstředivá síla. Díky tomu může mít zařízení velmi kompaktní rozměry. Pro optimalizaci procesu absorpce je nutné analyzovat charakter proudění uvnitř absorbéru. Tato práce je zaměřena na konstrukci a otestování unikátního strukturovaného lože s výplní z nerezových drátů a nosnými částmi z transparentního plexiskla určeného pro optickou analýzu vnitřního proudění. S použitím vysokorychlostní kamery byl zaznamenán charakter proudění kapaliny při různých provozních režimech. Měněnými provozními parametry byly otáčky lože, které dosahovaly hodnot od 300 do 1 800 ot/min, a rychlost proudu kapaliny přiváděné do lože, o velikostech od 1,25 až po 11,5 m/s. Při hodnocení charakteru proudění byla pozornost věnována hlavně začátku výplně lože, kde se nejvíce mění velikost kapek a jejich rychlost. Nicméně v práci nebylo opomenuto ani zhodnocení proudění napříč celým ložem. V práci jsou řečena také doporučení pro volbu provozních režimů, zhodnocení velikosti kapek a v neposlední řadě i empirická korelace pro výpočet absolutní rychlosti kapaliny na začátku výplně lože.

Klíčová slova

Rotační strukturované lože, transparentní packing, vizualizace proudění

ABSTRACT

Given the amount of energy and industrial processes that produce carbon dioxide, it is necessary to reduce the amount of CO_2 emitted into the atmosphere. One option is to capture and store the carbon dioxide produced, called CCS (Carbon Capture and Storage). For effective capture, a rotating packed bed absorber can be used, which works on a similar principle to a static absorption column, but the driving force of the liquid is not gravity but centrifugal force. This allows the device to be very compact in size. To optimise the absorption process, it is necessary to analyse the nature of the flow inside the absorber. This work focuses on the design and testing of a unique packed bed with stainless steel wire filling and transparent plexiglass support parts for optical analysis of the internal flow. Using a high-speed camera, the nature of the fluid flow was recorded under different operating modes. The changed parameters were the operating speed, which ranged from 300 to 1,800 rpm, and the velocity of the fluid flow, ranging from 1.25 to 11.5 m/s. When evaluating the nature of the flow, attention was paid mainly to the inner part of the packing fill, where the droplet size and velocity change the most. However, the assessment of the flow across the entire packing was also evaluated. Recommendations for the choice of operating modes, evaluation of droplet size and, finally, the empirical correlation for the calculation of the absolute liquid velocity at the inner part of the packing is also discussed.

Key words

Rotating packed bed, transparent packing, flow visualisation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁJEK, Jiří. *Transparentní packing pro optické experimenty v rotačním absorbéru* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/150115. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Milan Malý.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Transparentní packing pro optické experimenty v rotačním absorbéru** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum	*Jméno a příjmení*

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Milanu Malému, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Hájkovi a Ing. Patriku Bouchalovi, kteří mi pomáhali s optickým měřením a Ing. Ondřeji Cejpkovi a Ing. Ondreji Mišíkovi, za podporu při psaní této práce.

Současně bych chtěl poděkovat i rodině a přátelům, kteří mě podporovali jak během tvorby této práce, tak po celou dobu studia na VUT.

Realizace diplomové práce byla podpořena projektem GF21-45227L s názvem *„Holistický přístup k procesu absorpce v rotačním loži (RPB) s využitím 3D CFD, vizualizačních experimentů a experimentů přenosu hmoty“*.

OBSAH

1 ÚVOD 15
2 Absorpce 16
2.1 Statické absorpční kolony 16
2.1.1 Sprchový absorbér 17
2.1.2 Kaskádový absorbér 17
2.1.3 Náplňový absorbér 17
2.1.4 Probublávaný absorbér 17
3 Rotační absorbér 18
3.1 Historie rotačních loží 18
3.2 Typy packingu 20
3.2.1 Jednodílný strukturovaný packing (RPB) 21
3.2.2 Packing s podélnými přepážkami (BP-RPB) 22
3.2.3 Rozdělený strukturovaný packing (SP-RPB) 22
3.2.4 Zigzag packing (RZB) 23
4 Vizualizace proudění kapaliny uvnitř packingu 24
4.1 Kamerový záznam 24
4.2 Tomografie 26
4.3 Savý papír 27
4.4 Počítačové simulace 28
4.5 Laserová dopplerovská anemometrie 28
4.6 Fázová dopplerovská anemometrie 29
4.7 Integrální laserová anemometrie 30
4.8 Fluorescenční metoda 30
5 Shrnutí stavu poznání 31
6 Konstrukce transparentního packingu 34
6.1 I. iterace 34
6.2 II. iterace 36
6.3 III. iterace 37
7 Testovací zařízení 40
7.1 Popis původního zařízení 40
7.2 Provedené úpravy 40
7.2.1 Kryt 41
7.2.2 Distributory kapaliny 42
8 Ověření funkčnosti transparentního packingu 44
8.1 Vysokorychlostní kamera 44
8.2 Průtokoměr 47
8.3 Provozní režimy 47
9 Vyhodnocení experimentálních dat 48
9.1 Vizualizace proudění napříč celým packingem 48
9.2 Analýza proudění na začátku výplně packingu 51

9.3 Limitace transparentního packingu 55
10 Závěr 57
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 59
SEZNAM ZKRATEK 66
SEZNAM PŘÍLOH 67

1 ÚVOD

Vzhledem k čím dál přísnějším emisním limitům a skloňování uhlíkové neutrality v průmyslových procesech, je kladena vyšší pozornost na procesy čištění odpadních produktů, hlavně spalin. Ty mohou být čištěny od různých látek různými způsoby. Nicméně nejvíce zmiňovaná látka spojená s čištěním spalin je oxid uhličitý. K odstranění CO_2 ze spalin lze využít různých procesů, jako je chemická absorpce, adsorpce, kryogenní štěpení nebo membránová separace. Nejlépe aplikovatelnou technologií pro velkokapacitní průmyslové použití je chemická absorpce.

Proces absorpce je jedním ze základních chemických procesů, při kterém je plyn rozpouštěn v kapalině. Díky absorpci je například umožněn život aerobních organismů ve vodě, výroba různých minerálních kyselin nebo sycení nápojů. V kontextu s uhlíkovou neutralitou aspiruje, minimálně v Evropě, záchyt CO_2 ze spalin na nejrozšířenější absorpční proces v průmyslu.

Průmyslově používané absorbéry pro čištění spalin od CO_2 mají nejčastěji podobu statických kolon. Tato zařízení dosahují značných rozměrů, se kterými jsou spjaty i vysoké náklady na jejich výstavbu. Pro menší průmyslové zařízení tak může být výstavba absorpční kolony v souvislosti se zpřísňujícími se emisními limity finančně nedostupná.

Řešením tohoto problému je použití rotačního absorbéru, který při srovnání s kolonou může dosahovat výrazně menších rozměrů při zachování stejné schopnosti absorpce. Úspora místa je docílena díky urychlení kapaliny odstředivou silou místo síly tíhové, jak je tomu u statických kolon. Navzdory tomu, že koncept rotačního zařízení určeného pro čištění plynu je více jak 100 let starý, instalace rotačních absorbérů pro čištění spalin jsou spíše raritní.

Každý proces čištění spalin je energeticky náročný a přímo se podepisuje do ceny vyráběného produktu. Proto je kladeno mnoho úsilí na dosažení co nejvyšší efektivity absorpce v zařízení. Jelikož je tento proces závislý na mnoha parametrech, je nutné přistupovat ke zvyšování efektivity absorpce komplexně s využitím fyzikálního, chemického a v neposlední řadě i ekonomického pohledu.

Jedním z klíčových faktorů vedoucích k zefektivnění absorpce v rotačních absorbérech je pochopení vnitřního proudění pracovní kapaliny uvnitř zařízení. Na základě toho lze dimenzovat rozměry absorbérů, jejich vnitřní uspořádání, provozní otáčky i množství a rychlost pracovní kapaliny do absorbéru dodávané. Tato práce je zaměřena na konstrukci transparentního lože rotačního absorbéru, ve které bude možné opticky analyzovat chování pracovní kapaliny uvnitř zařízení. Díky této analýze bude možné popsat proudění uvnitř lože na základě vstupních parametrů, zhodnotit objevující se jevy a stanovit pravidla pro volbu provozních režimů.

2 Absorpce

Absorpce je chemický difuzní proces, při kterém dochází na mezifázovém rozhraní k rozpouštění plynu v kapalině (absorbentu) [1]. Průběh tohoto procesu závisí na mnoha faktorech, jako jsou například tlak, teplota, koncentrace reaktantů nebo rozpustnost plynu v kapalině [2]. V praxi se volí absorbenty s vysokou rozpustností plynů, jelikož s vyšší rozpustností klesá množství potřebného absorbentu. Efektivita absorpce se dá také ovlivnit rychlostí plynu a kapaliny, kdy při vyšších rychlostech dochází k zintenzivnění turbulentních fluktuací, tedy i přenosu hmoty [1].

Proces absorpce je využíván v širokém spektru procesů jako například při přípravě roztoků v chemickém průmyslu, v absorpčních obězích tepelných čerpadel nebo při odstraňování polutantů ze spalin. Absorpční zařízení k odstraňovaní nežádoucích složek z plynné fáze se označují jako pračky plynů. Ve smyslu čištění složek lze absorpci rozdělit na základě podstaty interakce mezi absorbovanou látkou a absorbentem [1]:

- Fyzikální absorpce – interakce jedné složky na základě její vyšší rozpustnosti v kapalné fázi. Rovnovážná koncentrace absorbované složky závisí na parciálním tlaku dané složky v plynné fázi.
- Reverzibilní reakce – vratná chemická reakce mezi sorbovanou složkou a absorbentem
- Ireverzibilní reakce – nevratná chemická reakce mezi absorbentem a absorbovanou látkou

Jelikož je absorpce difuzní proces, lze parametry, které ji ovlivňují stanovit na základě velikosti hustoty difuzního toku j. Jeho velikost je dána počtem molů dané látky n_{lat}, které projdou za čas t jednotkovou plochu S, viz následující vztah [1]:

$$j = \frac{n_{lat}}{t \cdot S} \; [mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \tag{1}$$

Současně I. Fickův zákon říká, že směr a velikost j jsou úměrné záporně vzatému gradientu koncentrace. Z toho plyne, že parametry absorpce, které mohou být ovlivněny konstrukcí absorbéru jsou pouze S a t. Absorbéry jsou proto konstruovány tak, aby bylo dosaženo co největšího povrchu mezifázového rozhraní a dostatečně dlouhého kontaktu obou médií. Tohoto se nejčastěji dosahuje pomocí následujících třech způsobů [1]:

- Probublávání bublinek plynné fáze fází kapalnou
- Skrápění plynné fáze pomocí dispergované kapalné fáze ve formě drobných kapiček
- Kapalná fáze prochází absorbérem skrze porézní materiál, kde dochází ke kontaktu s plynnou fází

2.1 Statické absorpční kolony

U průmyslových aplikací se absorpce realizuje nejčastěji ve statických kolonách, které ve vnitřní struktuře neobsahují žádné pohyblivé části. Kapalina po rozstřiku do kolony stéká pouze vlivem gravitace a nejčastěji proti směru proudu plynu [3]. Kolony mohou mít různé vnitřní uspořádání s ohledem na parametry procesu, avšak u všech je snaha docílit co největšího

mezifázového rozhraní kapalina–plyn [1]. Tato zařízení jsou převážně válcové a vyrábí se ve velké škále rozměrů, od kolon o průměru v desítkách centimetrů a výšce několika metrů až po kolony o průměru v jednotkách metrů a výšce několika desítek metrů [4].

2.1.1 Sprchový absorbér

Toto zařízení je konstrukčně velice jednoduché a vzhledem k ostatním typům statických absorbéru i levné. Ve vrchní části zařízení jsou umístěny trysky, síta nebo jiné zařízení schopné kvalitně rozprášit kapalinu. Do spodní části je přiváděn plyn, který proudí proti proudu padajících kapek absorbentu (v případě protiproudého uspořádání). Účinnost absorpce je ovlivněna schopností tvorby co nejmenších kapiček, rovnoměrně rozložených v objemu kolony. Velmi jemné rozptýlení absorbentu spolu nese i určité omezení, jako je například únos kapiček proudem plynu nebo vznik aerosolu. Výhodou je nízká provozní tlaková ztráta a malé tendence k zanášení. Sprchové absorbéry se používají u procesů s velkými průtoky plynů [1].

2.1.2 Kaskádový absorbér

V kaskádových absorbérech jsou skrápěny vodorovné nebo šikmé přepážky (kaskády) různých tvarů. Povrch mezifázového rozhraní je pak dán součtem ploch kaskád a ploch stékajících pramenů a kapek absorbentu. Výhodou tohoto vnitřního uspořádání je stejně jako u sprchového absorbéru malá tlaková ztráta a malá tendence k zanášení [1].

2.1.3 Náplňový absorbér

Vnitřní strukturu náplňového absorbéru tvoří rošty podpírající tělíska různých tvarů, po kterých proti proudu plynu stéká tenký film absorbentu. Tělíska mohou být přírodního původu (křemenné valouny) nebo uměle vyrobené z keramiky, kovu nebo plastu (Raschigovy kroužky, Lessingovy kroužky, Berlova sedélka a další) [5]. Náplň musí mít velký měrný povrch *a* a volný objem, ale zároveň malou objemovou hmotnost, jelikož s rostoucí hmotností náplně rostou konstrukční náklady na celou statickou kolonu. Často se v jednom absorbéru používá několik druhů tělísek, aby náplň byla co nejvíce neuspořádaná a netvořil se jeden nebo více průtokových kanálů [1]. Výhodou tohoto uspořádání je konstrukční jednoduchost, možnost volby náplně podle technologického procesu a dobrá chemická odolnost. Nevýhodou jsou vyšší hmotnost a tendence k zanášení. Navzdory nevýhodám je tento typ využíván v průmyslové praxi nejvíce [1, 6].

2.1.4 Probublávaný absorbér

V tomto zařízení dochází k fázovému kontaktu skrze probubláváním plynu absorbentem. Plyn je do kapaliny zaváděn pomocí vyústek zvonového nebo kloboukového tvaru. Tyto vyústky obvykle mívají ozubené okraje, které napomáhají tvorbě většího počtu menších bublin. Díky probublávání plynu dochází k intenzivnímu promíchávání kapalné fáze, což kladně ovlivňuje efektivitu absorpce. Další výhodou je velmi dobrý kontakt fází, menší rozměry a váha oproti náplňovým absorbérům. Nevýhodou je vyšší tlaková ztráta a konstrukční složitost vnitřního uspořádání [1,6].

3 Rotační absorbér

Na rozdíl od statických kolon, ve kterých kapalina proudí ve vnitřní struktuře zařízení pouze díky vlivu gravitace, u rotačních absorbérů je kapalina přiváděna do středu rotačního lože, které se v praxi označuje také jako packing, a po kontaktu s jeho výplní je urychlována odstředivou silou. Proti směru proudění kapaliny je veden plyn, který je v ose rotace odsáván. Tento princip se nepoužívá pouze u absorbérů ale lze ho využít i u jiných procesů jako je destilace, desorpce, produkce nanočástic nebo čištění plynů. Takové zařízení je v angličtině označováno jako HiGee.

Rotační lože mohou být o 1 až 2 řády menší než statické kolony o stejné hltnosti [7]. Je to dáno hlavně velikostí odstředivé síly, která bývá až 1000krát větší než tíhová, a díky tomu lze použít matrice s měrným povrchem až 10krát větším než u statických kolon. U některých aplikací může být a až 5 000 m^2/m^3 [8]. Velký měrný povrch napomáhá vzniku velkého mezifázového rozhraní, ale současně zvyšuje tlakovou ztrátu. Právě ta je jedním z hlavních faktorů udávající energetickou efektivitu zařízení. U náplňových statických kolon to je i konstrukční limitní faktor, kdy při určité hustotě matrice kapalina nemá dostatečnou energii k překonání tlakové ztráty. U rotačních loží je díky vysokým otáčkám n tlaková ztráta oproti statickým kolonám výrazně méně limitujícím faktorem. Rychlost rotace lože se odvíjí od konkrétní aplikace, běžně se však n pohybují v rozmezí od 500 do 2000 ot/min [8].

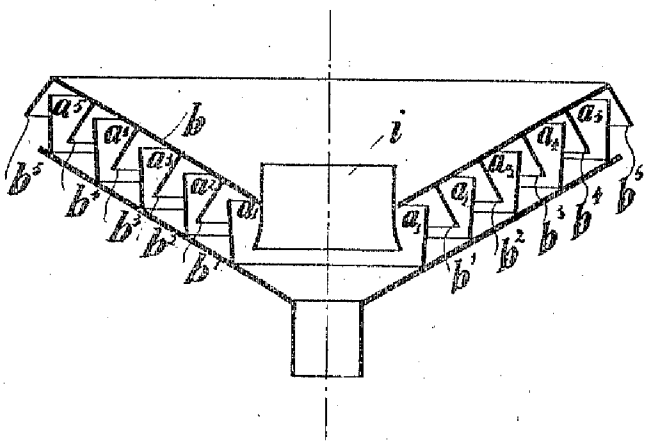
V roce 2007 Jassim a kol. publikovali studii zaměřenou na absorpci CO_2 zařízením se strukturovaným ložem neboli RPB (z anglického *„Rotating Packed Bed“*) [9]. Byla testována schopnost absorpce CO_2 roztoky o různé koncentraci ethanolaminu (MEA) a vody. Výsledky byly srovnány s dřívějšími studiemi absorpce CO_2 ve statických kolonách a RPB mělo výhodu v kompaktnosti a efektivitě provozu. V roce 2017 Chamchan a kol. v rámci studie měřili absorpci CO_2 v RPB a statické koloně [10]. Jako absorbent byl použit 30% roztok MEA a vody. Do obou zařízení byl přiváděn vysokopecní plyn, který obsahoval přibližně 30 % CO_2. Oproti studii z roku 2007 byla jako výhoda RPB uvedena pouze úspora místa, kdy při stejné absorpci mělo RPB třetinové rozměry oproti statické koloně. Studie dále uváděla, že nebyla zaznamenána vyšší efektivita RPB zařízení, jelikož schopnost absorpce byla při stejné spotřebě energie srovnatelná.

V současné době několik aplikací rotačních zařízení s packingem dosáhlo podle ukazatele TRL (z anglického *„Technology Readiness Level”*) úrovně 7 a více [11]. Ukazatel TRL hodnotí připravenost technologie pro komerční využití úrovněmi 1 až 9, kdy 1. úroveň je popsání základních principů fungování a 9. úroveň je úspěšný dlouhodobý průmyslový provoz. Úroveň 7 znamená, že technologie je plně otestovaná v relevantním prostředí (prototyp/pilotní projekt). Takové úrovně dosahuje například odstraňování SO_2 a popílku ze spalin nebo příprava chemických sloučenin jako methynel difenyl isokyanát (MDI). Nicméně například využití RPB pro získávání kyseliny chlorné již dosahuje TRL 9 [11].

3.1 Historie rotačních loží

V roce 1981 C. Ramshaw a R. Mallinson získali patent na rotační absorbér a jsou často v literatuře označováni za první, kdo přišel s konceptem rotačního lože [12, 13, 14]. Nicméně první použití rotujícího packingu uvedl v patentu Albert Elsenhans již v roce 1906, kde představil zařízení pro čištění plynu od pevných částic [15]. Jeho rotační lože se skládalo ze dvou disků s přepážkami, viz Obrázek 1, které byly instalovány na dvou různých hřídelích.

Díky tomu se disky mohly otáčet nejen různými rychlostmi, ale také různým směrem. Peter Schmidt v roce 1913 získal patent na zařízení stejné funkce, ovšem jeho zařízení mělo místo kruhových přepážek lože složené z drátěné sítě [16].



Obrázek 1 Disky s přepážkami rotačního lože z patentu Alberta Elsenhansa 1906 [15]

Polsko-americký vynálezce Walter Podbielniak v roce 1930 podal patent na protiproudé odstředivé zařízení [17]. Podbielniak využil odstředivé síly pro zvýšení přenosu hmoty při destilaci, čímž přišel s kompaktní alternativou k destilačním kolonám. Rotor zařízení, znázorňující Obrázek 2a, se skládal ze spirálovité trubky navinuté na kuželu, kterou proudila kapalina. Trubkou v opačném směru proudily i plyny odpařené při destilaci. Podbielniak si v následujících letech dal patentovat několik dalších rotačních zařízení na destilaci, míchání nebo odlučování [18,19,20]. Právě jeho zařízení umožnily masovou produkci penicilinu za druhé světové války [20].

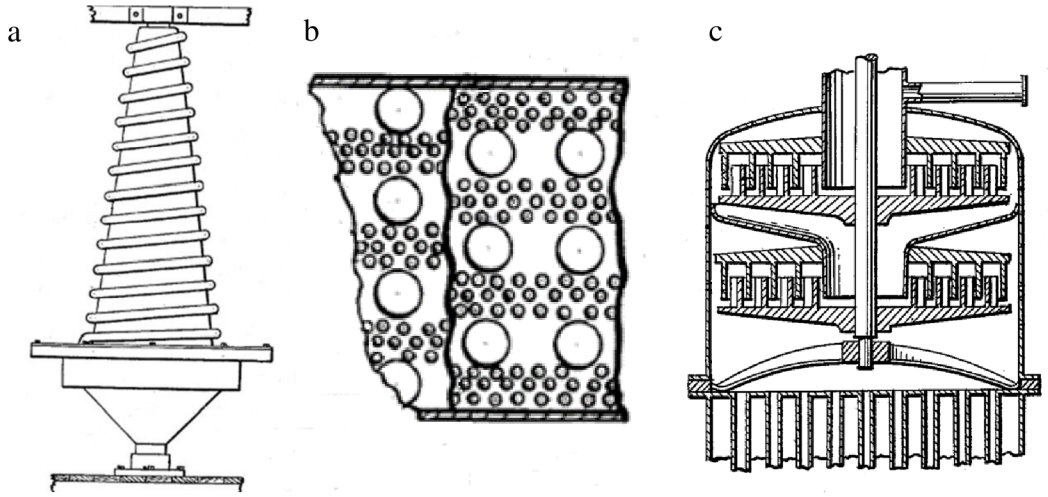
Podbielniak však nebyl jediný, kdo vyvíjel rotační lože. V roce 1939 George Thayer získal patent na odstředivý separátor omezeně mísitelných kapalin [21]. Tři roky poté Adolph Placek obdržel patent hned na čtyři rotační aparáty pro sycení kapaliny plynným médiem, tedy absorbéry. Na rozdíl od ostatních měla tato zařízení v přepážkách díry, viz Obrázek 2b [22]. Menší díry byly určeny pro průchod tekutiny směrem dál od osy rotace a větší díry byly určeny pro průchod plynu. Nevznikal proto pouze kapalinový film na stěnách přepážek, ale docházelo k intenzivnějšímu proudění formou kapiček a proudů kapaliny proti proudu plynu. Placek zároveň u jednoho ze svých zařízení použil podobné uspořádání přepážek jako Elsenhans, ze kterého vychází tzv. Zigzag packing, viz kapitola 3.2.4. Ten si však nechal patentovat až Peter Kapitza v roce 1952, kdy představil své vícepackingové rektifikační zařízení se střídavými přepážkami, viz Obrázek 2c [23].

V patentu z roku 1960 Wilhelm Pilo a Wilhelm Dahlbeck představují aparát pro kontakt dvou tekutin s rozdílnou hustotou [24]. Součástí patentu byl packing sestavený z drátěné sítě, podobný packingu, který patentoval Schmidt, a packing sestavený z plíšků různých tvarů. Pilo a Dahlbeck ve svém patentu uvádějí, že jejich zařízení při čištění svítiplynu od benzenu minerálním olejem, dosáhlo 40krát vetší čisticí kapacity na jednotku objemu, oproti tehdy běžně používaným statickým kolonám. Navzdory těmto úspěchů nebyla jejich RPB věnována větší pozornost společnosti. Rotační absorbéry se dostaly do povědomí inženýrů až o 21 let později, díky již zmíněnému patentu Ramshawa a Mallinsona.

Colin Ramshaw byl významný chemický inženýr, vědec a vynálezce, který je považován za ambasadora tzv. procesu intenzifikace (PI) [25]. Ramshaw v roce 1995 popsal PI jako proces dramatické redukce rozměrů chemických zařízení. Tato definice je poměrně dost konkrétní, nicméně od té doby se pojem PI rozšířil i do technických oborů mimo chemii. Proces intensifikace by se dal popsat jako proces vývoje nových zařízení a technik, které v porovnání s těmi běžně používanými přináší významné zefektivnění výroby, zmenšení rozměrů zařízení, snížení spotřeby energie, úspory finančních prostředků nebo snížení produkce odpadů [25].

Ramshaw a Mallinson prezentovali svůj patent na rotační absorbér právě v kontextu s procesem intenzifikace, čímž se dostal do podvědomí mnoha chemických inženýrů. Jejich zařízení demonstrovalo zefektivnění absorpce amoniaku vodou, kyslíku vodou a destilace směsi methanolu a ethanolu [26]. Použité RPB bylo velice podobné zařízení Piloa a Dahlbecka, nicméně přínos patentu Ramshawa a Mallinsona byl právě ve vyčíslení koeficientů přestupu hmoty na základě experimentů.

Od této doby bylo sestaveno mnoho výzkumných týmů po celém světě, které představily různé packingy, avšak většina z nich vycházela z výše zmíněných patentů. Na několika čínských univerzitách vznikla centra zabývající se HiGee, tzv. HIGH Gravity Engineering and Technology Centers. Díky velkému vědeckému zázemí se většina průmyslových aplikací RPB nachází právě v Číně [27].



Obrázek 2 a) Rotor zařízení patentovaného 1930 Podbielniakem [17]; b) Přepážky Plackova aparátu [22]; c) Kapitzovo vícepackingové zařízení [23]

3.2 Typy packingu

Obecně se packing skládá z nosných disků, které nesou výplň packingu a jsou napojeny na poháněnou hřídel, případně hřídele. Packing může být orientovaný jak s osou rotace v horizontálním, tak ve vertikálním směru. Do středové části packingu je zavedena pracovní tekutina, která je buď pouze přiváděna, nebo distributorem rozstřikována do vnitřní struktury. O vnitřní strukturu se kapalina rozráží na malé kapičky a rotující packing jim předává kinetickou energii. Kapičky po průchodu packingem vylétají a jsou zachyceny těsnicím stacionárním krytem, který izoluje pracovní prostor zařízení od vnějšího prostoru. Pracovní plyn proudí nejčastěji proti proudu kapiček do středové části packingu, ze které je odsáván.

Samotná výplň rotačního lože může mít různou geometrii. Tu určují požadavky technologického procesu, ve kterém je zařízení použito. Geometrie se může odvíjet od požadované tlakové ztráty, viskozity médií nebo mechanického znečištění médií. U všech packingů je však snaha o dosažení co největšího mezifázového rozhraní mezi kapalinou a plynem a co nejdelšího kontaktu těchto dvou fází.

3.2.1 Jednodílný strukturovaný packing (RPB)

Základem tohoto packingu je strukturovaná výplň, která může být pravidelná i nepravidelná. Výplň může být tvořena samostatnými příčnými dráty, navinutou drátěnou sítí, kovovou pěnou nebo také stejnou výplní jako u statických kolon, tedy různými tělísky nebo soustavami perforovaných plíšků. Ve studii z roku 2006 Chen a kol. porovnávali několik typů strukturovaných packingů s ohledem na jejich tvar, materiál a velikost [28]. Bylo porovnáno 11 packingů, z nichž jeden byl tvořen drátěnou sítí a zbylé byly vyplněny korálky a sedélky z různých materiálů. Pro vyhodnocení byly porovnávány přestupy hmoty v packinzích mezi kyslíkem a vodou v závislosti na rychlosti rotace a hmotnostním toku kapaliny m. Závěrem této studie bylo, že nejméně účinné byly packingy vyplněné Raschigovými kroužky a sedélky Intalox z důvodu špatné distribuce kapaliny mezi tělísky. Na druhou stranu nejvíce účinný byl packing s drátěnou sítí.

Lože s drátěnou sítí bývají díky jejich jednoduché konstrukci často používány v experimentálních aplikacích. Důvodem je pravidelná geometrie, a na rozdíl od ostatních výplní tedy i možnost snadného vytvoření počítačového modelu a následného simulování proudění v packingu. V ostatních typech výplně je míra neuspořádanosti vyšší a s ní i časová náročnost výpočtu simulace. Sítě, většinou vyrobené z nerezové oceli, mohou mít jak různou tloušťku drátů, tak různou velikost ok. V packingu je drátěná síť nahusto navinuta nebo rozmístěna v koncentrických prstencích s většími rozestupy. Porovnání packingů s drátěnými sítěmi různých rozměrů se věnovala studie z roku 2012, ve které bylo testováno hned 8 packingů [29]. Výsledek studie potvrdil očekávání, že plocha mezifázového rozhraní mezi pracovním plynem a kapalinou roste se zvyšující se rychlostí otáčení packingu a klesá se zvětšující se tloušťkou drátů a velikostí ok sítě.

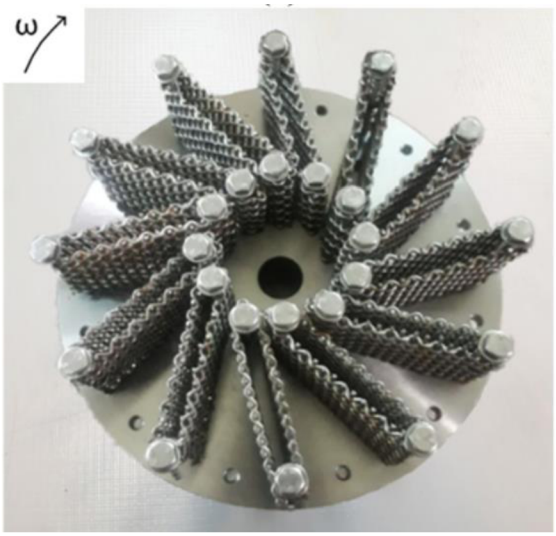
Kromě packingů s drátěnou sítí se často využívají také packingy s kovovou pěnou. Ty mohou být vyrobeny např. z hliníku, karbidu křemíku, niklu nebo chrom-niklu [30, 31, 32]. Výhodou kovových pěn je velký měrný povrch a, nízká měrná hmotnost, dobrá mechanická pevnost a korozní odolnost. Velká porozita kovových pěn také snižuje tlakovou ztrátu packingu, čímž zvyšuje účinnost zařízení [30]. Packingy s kovovou pěnou mohou dosahovat až o 40 % vyšší efektivnosti přenosu hmoty a o 20 % menší tlakové ztráty než packingy s drátěnou sítí [33].

U jednodílného strukturovaného packingu se využívá kromě protiproudého uspořádání proudů médií také křížové uspořádání, při kterém pracovní plyn proudí packingem v axiálním směru. Při protiproudém uspořádání je maximální průtok plynu omezen velikostí výstupního odsávacího potrubí, které musí být menší než vnitřní průměr výplně packingu. U křížového uspořádání proudů je průtočná plocha, kterou plyn proudí, konstantní.

3.2.2 Packing s podélnými přepážkami (BP-RPB)

Zvláštním typem jednodílného strukturovaného packingu je rotační lože s podélnými přepážkami. Tento typ, poprvé představený ve studii Lina a Jiana v roce 2006, byl vyvinut za účelem zmenšení tlakové ztráty plynu v packingu. Podélné přepážky z drátěné sítě byly umístěny v packingu radiálně pod úhlem 30 °. V roce 2022 Jamaat a Abolhasani vydali studii, ve které porovnávali různé úhly natočení přepážek v radiálním směru [34]. Přepážky jejich packingu byly tvořeny pruhy drátěné sítě, viz Obrázek 3. Závěrem studie bylo že sklon přepážek výrazně zvětšuje koeficient přestupu hmoty v packingu. Pro studií testovaný proces (pokročilé míchání na molekulární úrovni) byl uveden úhel radiálního sklopení 45 ° jako nejvíce efektivní. V roce 2012 Luo a kol. publikovali studii, ve které testovali pět packingů, které sestávaly z koncentrických kruhů pórovité výplně, mezi kterými byly radiálně skloněné podélné přepážky [35]. Testovacím procesem byla absorpce CO_2 pomocí NaOH. Závěrem bylo, že při použití těchto packingů koeficient přestupu hmoty při absorbci CO_2 vzrostl oproti strukturovaným packingům o 8 až 68 %.

Výhodou těchto packingů je nízký pokles tlaku plynu při průchodu packingem oproti jiným konstrukčním typům packingů. Nevýhodou však je omezený počet podélných přepážek, a tedy poměrně malý specifický povrch packingu.



Obrázek 3 Packing s přepážkami skloněnými pod úhlem 45 ° [34]

3.2.3 Rozdělený strukturovaný packing (SP-RPB)

Rotační zařízení s jednodílným strukturovaným packingem je konstrukčně výrazně jednodušší než zařízení s rozděleným packingem. Konstrukce tohoto packingu je podobná dříve zmíněnému zařízení Alberta Elsenhansa. Na rozdíl od jeho patentu, novodobé zařízení s rozdělenými packingy mají nosné disky kolmé k ose otáčení a mají širší využití než jen čištění plynů od pevných částic.

Jako výplň rozděleného packingu můžou být použity stejné prvky jako u jednodílného. Nejčastěji se používají přepážky, drátěné sítě a kovové pěny. Výplň packingu není celistvá, ale je ve tvaru koncentrických kruhů, mezi kterými je úzká mezera. Tyto kruhy jsou střídavě připevněny na nosné disky, které jsou upevněny na dvou hřídelích. Díky tomu může každý disk spolu s částí výplně rotovat různými otáčkami i různým směrem.

V roce 2005 Chandra a kol. představili rozdělený packing, ve kterém rotovaly nosné disky s různými přepážkami [36]. Jeden disk měl přepážky z kovové pěny, avšak ten druhý měl přepážky z nerezové sítě. Díky tomuto uspořádání bylo dosaženo vyšší úhlové rychlosti plynu, a tak i zvýšení koeficientu přestupu hmoty na straně plynu oproti statickým kolonám. U klasických RPB je tento koeficient stejný jako u statických kolon [37]. Navíc bylo zjištěno, že celková tlaková ztráta při otáčení disků packingů proti sobě je menší než při rotaci obou disků stejným směrem [36]. O rok později byla se stejným packingem prezentována studie, která uváděla, že koeficient přestupu hmoty na straně plynu může být až 280krát větší u rozděleného packingu než u jednodílných strukturovaných packingů a statických kolon [37].

Díky velké konstrukční složitosti nelze vytvořit, na rozdíl od jednodílných loží, vícepackingové zařízení. Tím se výrazně omezuje možnost využití tohoto konstrukčního uspořádání pro aplikace s velkými hmotnostními průtoky médií, jelikož pro tyto aplikace je vhodné použití více packingů na jedné hřídeli v paralelním uspořádání.

3.2.4 Zigzag packing (RZB)

Hlavním znakem tohoto uspořádání je, že je pouze jeden z nosných disků přichycen k pohonné hřídeli. Při horizontálním uspořádání to bývá spodní disk. Druhý disk je pak stacionární a je přichycen ke stacionárnímu krytu. Výplň je tvořena z přepážek, které jsou střídavě umístěny na nosné disky, podobně jako u SP-RPB. V horní části přepážek rotujícího nosného disku mohou být i perforace, jak je tomu například v patentu Ji a kol. z roku 2008 [38]. Pracovní kapalina je zde opět přiváděna do středu packingu, avšak díky unášení kapaliny rotujícími přepážkami a následnému střetu se stacionárními přepážkami není zapotřebí používat žádný distributor kapaliny, jako tomu je u dříve zmíněných packingů [39].

I tento packing je díky své geometrické jednoduchosti často používán u experimentů, které jsou spojeny s počítačovými simulacemi nebo je ověřují [40, 41, 42, 43]. V roce 2008 Wang a kol. provedli srovnání RPB a RZB, jehož výsledkem bylo, že zigzag packing má sice výrazně větší regulační poměr (poměr mezi maximálním a minimálním provozním průtokem) ale jinak jsou koeficienty přestupu hmoty u obou zařízení srovnatelné [44, 45]. Avšak ve studii z roku 2017 Li a kol. dospěli k závěru, že jejich zigzag packing má ve srovnání se strukturovaným packingem až 2,5krát větší koeficient přenosu hmoty na straně kapaliny [46]. Je tedy zřejmé, že nezáleží pouze na typu packingu, ale přímo na konkrétní konstrukci a geometrii. Obě studie se však shodují, že koeficient přestupu hmoty na straně plynu byl u RPB i RZB srovnatelný.

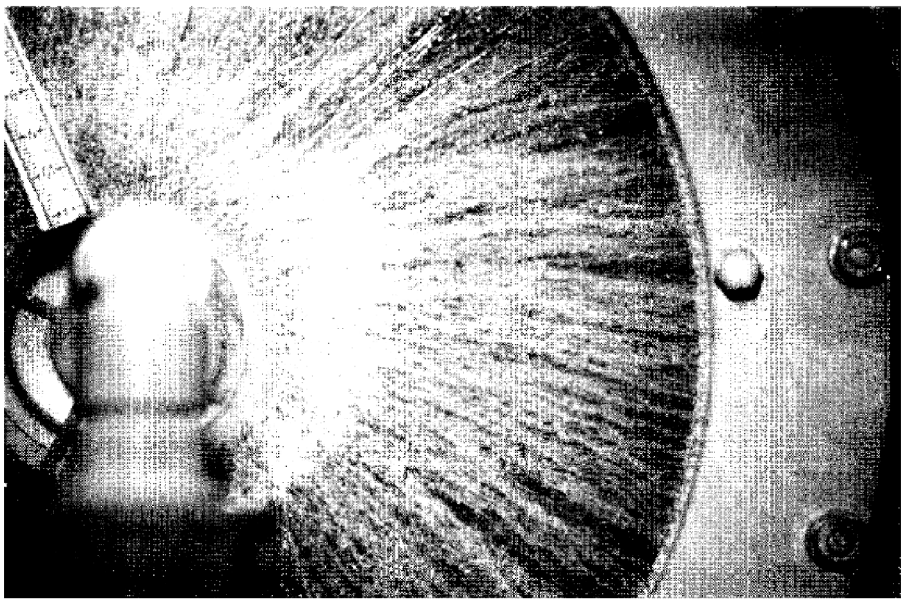
Výhodou tohoto packingu je konstrukční jednoduchost, která umožňuje konstrukci více packingů na jedné hřídeli. Tím se při paralelním uspořádání zvýší hltnost zařízení, případně při sériovém uspořádání kvalita reakce v zařízení. Sériové uspořádání je uvedeno již v Kapitzově patentu z roku 1952. Jelikož rotuje pouze spodní disk, je použito pouze jedno axiální ložisko místo dvou. Další výhodou je také, již dříve zmíněná, absence distributoru pracovní kapaliny, která je urychlována pouze přepážkami. Z toho současně pramení i nevýhoda vyšší energetické náročnosti packingu. Jelikož se kapalina na každé stacionární přepážce téměř zastaví, a ztratí tak svoji kinetickou energii, každá následující rotující přepážka jí musí kinetickou energii opět předat. Díky tomu je u RZB zařízení energie spotřebovaná na proudění kapaliny v packingu až 2,5krát vyšší než u RPB zařízení [47]. Zigzag packing má také vyšší tlakovou ztrátu v porovnání se strukturovanými packingy.

4 Vizualizace proudění kapaliny uvnitř packingu

Pro optimalizaci procesu přenosu hmoty mezi plynem a absorbentem, je zapotřebí přesně zamapovat charakter proudění uvnitř zařízení. Znalost charakteru proudění v packingu je také klíčové pro zhodnocení validity počítačových simulací, které jsou v dnešní době podstatnou částí procesu optimalizace.

4.1 Kamerový záznam

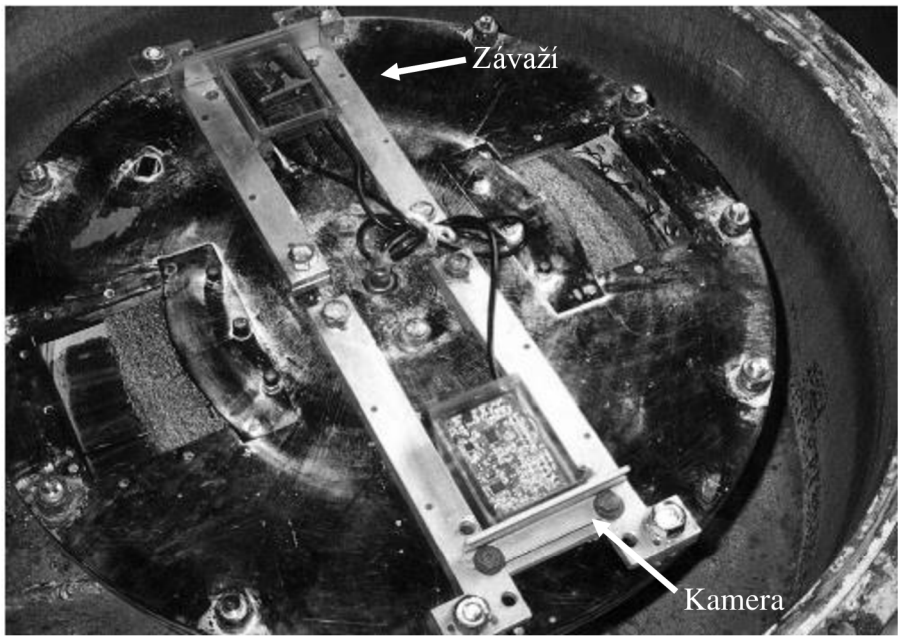
V roce 1995 Burns a Ramshaw prezentovali studii zaměřenou na vizuální analýzu rozložení kapaliny uvnitř packingu [48]. Jejich experimentální sestava se skládala ze strukturovaného packingu, jednostranně průhledného krytu packingu, motoru a kamery. Výplň packingu s vnitřním průměrem d_{in} = 70 mm a vnějším d_{out} = 320 mm byla z pórovitého PVC o průměrné tloušťce struktury 0,15 mm a a = 1500 m^2/ m^3. Jako pracovní kapalina byl použit 3–7 % roztok vody a bílé barvy pro dosažení co nejvyššího kontrastu s černým pozadím packingu, viz Obrázek 4. Pracovním plynem byl vzduch, který proudil proti směru kapaliny. Závěrem studie bylo, že při nízkých otáčkách n do 600 ot/min dochází v packingu ke spojitému proudění kapaliny, které se s rostoucími otáčkami mění na proudy kapiček. Pomocí této zobrazovací metody však nebylo možné s jistotou určit, zda je na povrchu packingu vrstva kapalného filmu.



Obrázek 4 Distribuce tekutiny v prvním průhledném packingu při 750 ot/min [48]

V roce 1999 Guo a kol. publikovali výsledky experimentu, při kterém připevnil kameru přímo na rotor zařízení, viz Obrázek 5 [49]. V jejich studii byl testován packing s výplní z drátěné sítě, tvořený dráty o průřezu 0,3 × 0,7 mm^2 s a = 469 m^2/m^3 a packing s výplní z kovové pěny o velikosti děr 2 až 4 mm a a = 500 m^2/ m^3. Oba packingy měly stejné rozměry výplně, tedy d_{in} = 252 mm a d_{out} = 452 mm. Kamera byla umístěna v malém boxu z plexiskla, přichyceného přímo na nosný disk packingu. Naproti kameře v radiálním směru bylo umístěno závaží pro kompenzování nevývahy způsobené kamerou. Signál z kamery byl hřídelí vyveden, a bylo tak možné získat živý přenos charakteru proudění uvnitř packingu. Výsledkem bylo,

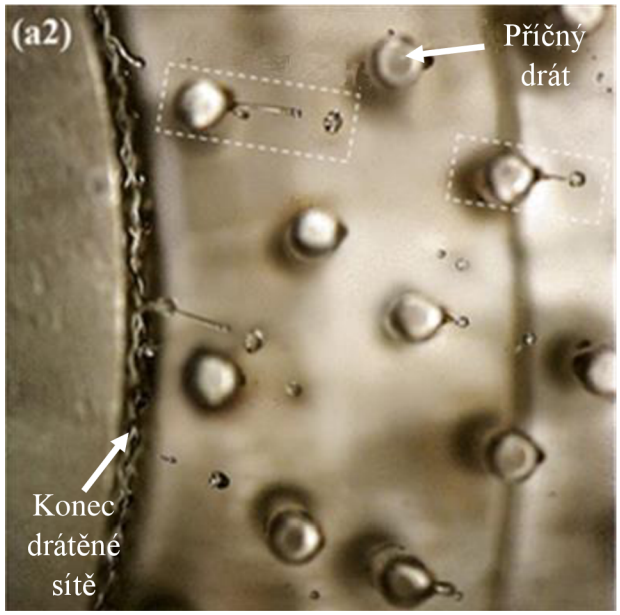
že k nejintenzivnějším srážkám a míchání dochází ve vzdálenosti 7 až 10 mm od vnitřního průměru packingu. Studie také uvádí, že při 20 různých provozních režimech měl film vytvořený na povrchu kovové pěny tloušťku od 20 do 80 μm a u packingu s drátovou sítí dosahoval film tloušťky pouze 10 μm.



Obrázek 5 Packing s integrovanou kamerou [49]

S technologickým pokrokem se výrazně zlepšilo rozlišení a snímací rychlost kamer. Díky tomu je možné získat kvalitní záznam proudění i při použití statické kamery. Yang Kuang a kol. v roce 2011 a Sun Runlin a kol. v roce 2013 publikovali studie zaměřené na zobrazování charakteru proudění uvnitř a za packingem pomocí statické vysokorychlostní kamery [50]. Závěrem jejich pozorování bylo, že nejvýraznější změna vektoru rychlosti kapaliny z tangenciálního na radiální se odehraje v prvních přibližně v 8 mm packingu. Při dalším průchodu kapaliny packingem se směr vektoru rychlosti téměř nemění.

Postupem času se objevují i další studie s vysokorychlostní kamerou, například od Sang a kol. z roku 2017 nebo od Yan-Zhen Lu a kol. z roku 2019 [51, 52]. Tyto studie se však zabývají pouze prouděním kapaliny na výstupu z packingu. V roce 2020 Liu a kol. publikovali studii, ve které zkoumali proudění přímo uvnitř packingu [53]. Tento packing se skládal z prstence husté drátěné sítě a ze samostatných příčných drátů, viz Obrázek 6. Vnitřní průměr části s drátěnou sítí byl 147 mm, vnější 197 mm a vnější průměr navazující části s příčnými dráty byl 325 mm. Závěrem studie bylo, že na příčných drátech se tvořily dlouhé kapky, které se následně odtrhávaly. Studie také uvádí, že průměr kapek v oblasti s příčnými dráty byl menší než v oblasti drátěné sítě, u glycerínu byl tento rozdíl až 20 %. Velikost kapek je totiž závislá na množství srážek kapaliny s packingem [53]. V použitém packingu byla oblast příčných drátů výrazně větší než oblast drátěné sítě, docházelo v ní tedy k intenzivnější interakci, a proto i ke vzniku menších kapek.

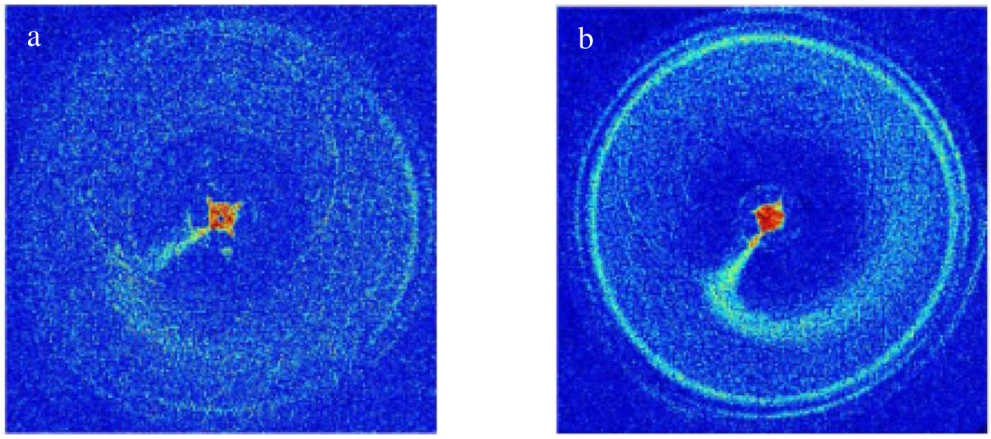


Obrázek 6 Transparentní packing s duální drátěnou sítí [53]

4.2 Tomografie

Některé konstrukce packingů neumožňují transparentnost, je proto nutné použít jiných než optických metod zobrazování. Tomografie je metoda zobrazování tělesa v sérií řezů. Pro vytvoření těchto řezů jsou používány různé metody jako např. prosvícení rentgenovým nebo gama zářením či využití rozdílné elektrické impedance a kapacity materiálů. Poslední dvě zmíněné metody, tedy elektrická impedanční tomografie (EIT) a elektrická kapacitní tomografie (ECT), umožňují velice rychlé měření, avšak na úkor rozlišení [54]. Oproti tomu rentgenová tomografie nebo také výpočtová tomografie (CT) a jednofotonová emisní výpočetní tomografie (SPECT) využívající gama záření mají vysoké rozlišení s nižší rychlostí záznamu, která se ovšem s technologickým pokrokem velmi zrychlila až na 7 000 snímků za minutu [55].

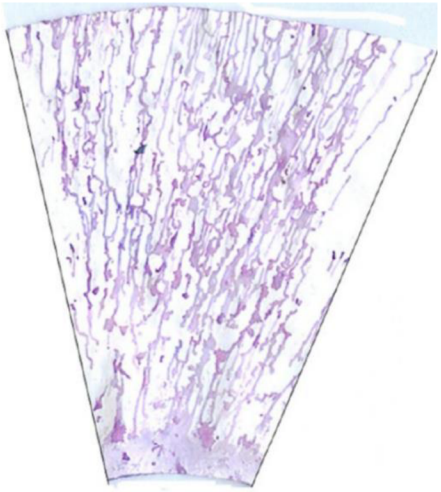
CT a SPECT se využívají v lékařství již desítky let. Pro neinvazivní mapování proudění se tyto metody používají od 80. let 19. století [55]. Tschentscher a kol. v roce 2011 použili gama záření pro zobrazení proudění v reaktoru s rotující kovovou pěnou, s provozními režimy od 150 do 400 otáček za minutu [56]. Rozdíl mezi reaktorem použitým v experimentu a RPB je v přívodu čistých pracovních tekutin. Zatímco reaktor byl zařízením vsádkovým, RPB se používá jako zařízení průtočné. Nicméně tato studie prokázala, že SPECT lze použít pro kvalitní zobrazení proudění v rotačním zařízení. V roce 2015 Yang a kol. použili CT pro analýzu proudění uvnitř RPB s drátěným packingem a packingem z niklové pěny, viz Obrázek 7 [57]. V experimentu byly použity n = 500–2 500 ot/min a pracovní kapaliny s různou viskozitou. Výsledky ukázaly, že zdržení pracovní kapaliny v packingu bylo vyšší s rostoucím množstvím přiváděné pracovní kapaliny a s vyšší viskozitou kapaliny, naopak klesalo s vyššími n. Při stejných provozních režimech se kapalina zdržovala kratší čas v packingu z drátové sítě v porovnání s packingem z niklové pěny. Výsledky získané tomografií se shodují s výsledky z předešlých studií.



Obrázek 7 Zobrazení proudění vody pomocí SPECT v a) drátěném packingu; b) packingu z niklové pěny při průtoku kapaliny 82,56 kg/h a rychlosti rotace packingu 500 ot/min [57]

4.3 Savý papír

Yan, Lin a Ruan v roce 2012 představili metodu pro analýzu proudění v packingu pomocí savého papíru [58]. Experimentální packing, s vnitřním průměrem 100 mm a vnějším 300 mm, byl sestaven z ocelových plátů, mezi kterými byly nasypány malé trojúhelníkové spirály. Savý papír byl v packingu umístěn v různých polohách a náklonech tak, aby na něm byl zaznamenán průchod kapaliny celým packingem v radiálním směru. Pracovní tekutinou byla obarvená voda, která na papíře zanechávala stopy po proudění, viz Obrázek 8. Objem tekutiny přivedené do packingu během jednoho měření byl od 45 do 500 ml. Při dodání většího objemu by stopy po proudění splývaly nebo by došlo k rozmočení savého papíru. Měření probíhalo v rozsahu od 600 do 1200 ot/min. Autoři uvádí, že tato metoda je vhodná pro průmyslové použití díky její jednoduchosti a rychlosti, kdy lze během několika minut ověřit správné fungování rotačního lože bez použití drahé zobrazovací techniky. Výsledky také potvrzují závěry studií Guo a kol., Kuang a kol. a Runlin a kol., tedy že kapalina nejvíce mění směr při vstupu do packingu a následně prochází téměř beze změny směru.



Obrázek 8 Savý papír se stopami proudění v packingu [58]

4.4 Počítačové simulace

Nedílnou součástí optimalizace procesů jsou mimo jiné i počítačové simulace. Jedni z prvních, kdo použili počítačovou analýzu v souvislosti s RPB, byli chemici Llerena-Chavez a Larachi v roce 2009 [59]. Analýze zaměřené na rozložení tlakové ztráty a distribuci plynu podrobili různé modely packingů z drátěné sítě a kovové pěny. Závěrem této 3D analýzy bylo, že v reálném provozu s plynem a pracovní kapalinou se chování plynu bude výrazně lišit, a proto by měla být tato analýza proudění v „suchém“ packingu brána pouze jako předběžná při porovnávání s dvoufázovým prouděním. V roce 2017 Liu a kol. navázali na tuto analýzu a publikovali 3D simulaci zaměřenou na proudění plynu v packingu [60]. Jejich simulace byla validována na základě tlakové ztráty experimentálního packingu. Analýza ukazuje, že ve středu packingu vzniká velké zavíření, které může značně přispívat k tlakové ztrátě.

Shi a kol. v roce 2013 publikovali studii zaměřenou na 2D zobrazení proudění kapaliny uvnitř strukturovaného packingu pouze s drátěnou sítí a packingu s přepážkami a drátěnou sítí [61]. Výsledky počítačové analýzy se shodovaly s analýzou proudění jinými prostředky, tedy že kapalina nejvýrazněji mění směr při vstupu do packingu a že se zvyšující rychlostí rotace lože klesá velikost vznikajících kapek. Na tuto publikaci navazuje studie z roku 2017, v níž Xie a kol. simulovali 2D proudění v drátěném packingu rotačního absorbéru [62]. Výsledky simulací byly validovány na základě dřívějších studií. Závěrem studie bylo tvrzení, že 2D simulace proudění je efektivní způsob analýzy chování kapaliny uvnitř packingu.

Tyto 2D simulace navzdory tomu, že uvádí, že se jedná o simulaci proudění v packingu s drátěnou sítí, používají jako výchozí model výplň ze samostatných drátů. Při 2D modelování výplně z drátěné sítě by kapalina neprošla ani první řadou drátů, jelikož by jí v cestě stály dráty ležící v rovině kolmé na osu rotace. Tento problém lze eliminovat modelováním proudění v jiné axiální rovině, kde tyto dráty nejsou, avšak pak modelované proudění neodpovídá tomu skutečnému.

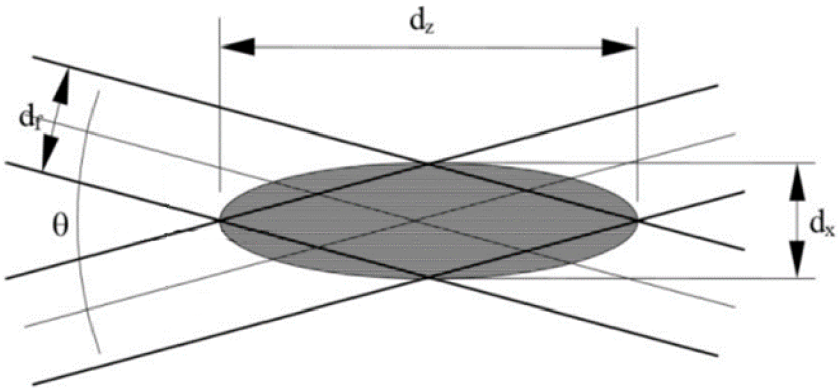
Pro všechny typy packingů, je nutné pro simulování vnitřního proudění použít 3D analýzu. V roce 2022 Zhang a kol. publikovali studii zaměřenou na 3D modelování proudění v packingu s drátěnou sítí [63]. Ve studii byla mimo jiné věnována i pozornost ovlivnění chování kapaliny hydrofobii materiálu packingu. Použitím hydrofobního materiálu dochází ke zlepšení disperze kapaliny, zatímco při použití hydrofilního materiálu dochází ke zvětšení efektivního rozhraní mezi kapalinou a plynem. Studie uvádí, že je vhodné packing koncipovat tak, aby hydrofobní materiál byl v oblasti vstupu kapaliny do packingu a zbytek výplně byl z hydrofilního materiálu.

Nespornou výhodou této zobrazovací metody je její dostupnost v porovnání s vizualizací proudění pomocí vysokorychlostní kamery nebo tomografie. Na druhou stranu, výsledky simulací mohou být často zavádějící a je nutné mít simulaci dobře odladěnou s použitím správných okrajových podmínek. K tomuto odladění je potřeba validovat simulace s reálným chováním kapaliny v packingu, a tedy mít k dispozici i další zobrazovací metodu nebo čerpat z dříve publikovaných studií.

4.5 Laserová dopplerovská anemometrie

Tato metoda umožňuje měřit rychlosti částic v průhledných nebo poloprůhledných tocích tekutiny na základě Dopplerova jevu. Při měření je použito monochromatické laserové světlo o specifické vlnové délce (514,5 nm pro zelenou barvu, 488 nm pro modrou barvu atd.). Laserový svazek je přes vysílací optiku fokusován do měřicího objemu, kde dochází k rozptylu

paprsku na povrchu částice. Frekvence rozptýleného světla je závislá na rychlosti a směru částice vůči detektoru. Jelikož je tento frekvenční posun typicky velmi malý, využívá se zde interference dvou svazků, které se protínají a tvoří elipsoidní měřicí objem, viz Obrázek 9. Délka měřicího objemu d_z a jeho průměr d_x je funkcí průměru laserových svazků d_r a úhlu θ mezi nimi [64].



Obrázek 9 Měřicí objem [64]

Použití laserové dopplerovské anemometrie (LDA) prezentovali poprvé Yeh a Cummins v roce 1964 [65]. Pomocí LDA měřili rychlost proudění kapaliny s částečkami polystyrenu o průměru 0,557 μm pomocí spektrometru s helium neonovým laserem. Tato metoda lze použít například pro analýzu rychlostního pole ve statické koloně, nicméně pro rotační lože je aplikace problematická. Limitujícím faktorem je konstrukce packingu a nečistoty usazující se na transparentních nosných částech. Výplň packingu ani kapky na plexiskle totiž nesmí narušit laserové svazky dříve, než se protnou. K měření vnitřního rychlostního pole by LDA bylo možné použít pouze u packing se samostatnými příčnými dráty nebo s koncentrickými prstenci drátěné sítě s dostatečnými rozestupy, aby výplně neblokovaly laserové paprsky. Pro tuto aplikaci je LDA nevhodné také díky malému měřicímu objemu, který se pohybuje v řádech jednotek milimetrů krychlových.

4.6 Fázová dopplerovská anemometrie

Tato metoda se používá pro měření velikosti i rychlosti částic. Její princip je podobný jako u LDA, ovšem fázová dopplerovská anemometrie (PDA) požívá místo jednoho detektoru dva nebo tři, každý umístěn pod jiným elevačním úhlem. Detektory zaznamenají rozptýlené světlo o stejné frekvenci ovšem s různým fázovým posunem, který je závislý na velikosti částice. Měřicí aparatura s dvěma detektory umožňuje rozlišit fázový posun od 0 do 2π. Pro širší rozlišitelné spektrum je zapotřebí použití třetího detektoru.

V roce 1975 Durs a Zaré jako první použili tuto metodu pro analýzu různých dvoufázových proudění [66]. PDA se stejně jako LDA používá hlavně při měření proudění ve statickém objemu. Ze stejných důvodů jako u LDA se tato metoda nepoužívá pro analýzu vnitřního proudění v rotačních ložích. Navíc díky nutnosti většího počtu detektorů a nutnosti mít přijímací optiku umístěnou v relativně úzkém spektru úhlů, je uspořádání měřicí aparatury ještě složitější.

4.7 Integrální laserová anemometrie

Označovaná také jako PIV (z anglického *„Particle image velocimetry“*) je metoda používaná pro měření rychlostního pole za pomocí kamery a laserové roviny. Laserový svazek je přes optiku roztažen do laserového listu. Kapičky procházející laserovým listem jsou osvětleny a zaznamenány kamerou. Pro kvalitní měření je nutné zajistit kolmost osy objektivu kamery na rovinu laserového listu. Kamera typicky pořídí dva snímky za sebou. Při známé snímkovací frekvenci a z velikosti posuvu kapek na dvou po sobě jdoucích snímcích lze stanovit jejich rychlost. Snímkovací frekvence kamery musí být nastavena tak, aby kapky procházející měřicím objemem byly alespoň na dvou snímcích. Při vysokých rychlostech proudění nebo u malých měřicích objemů lze alternativně využít vysokorychlostní kamery.

Označení PIV poprvé použili Pickering a Halliwell ve své studii z roku 1984 [67]. Tato metoda oproti bodovým metodám jako je LDA a PDA zaznamená proudění v celé rovině. Je tedy vhodnou metodou například pro měření kvality spreje trysek. Z důvodu uspořádání kamery a laserového svazku není tato metoda použitelná pro měření uvnitř packingu.

4.8 Fluorescenční metoda

Charakter proudní lze analyzovat také přidáním fluorescenčního barviva. Fluorescence je jev, při němž látka nejdříve absorbuje fotony, které následně přejdou do excitovaného stavu a jsou vyzářeny. Jelikož fluorescenčního barviva nemusí být mnoho, vlastnosti pracovní kapaliny se výrazně nezmění. Při proudění kapaliny s barvivem ve snížených světelných podmínkách dochází k excitaci fotonů, které jsou zachyceny na snímací čip vysokorychlostní kamery. Podle intenzity světla zaznamenaného kamerou lze určit oblasti vyšší rychlostí proudění, změny směru nebo tvorby vírů.

První zmínky o analýze proudění kapaliny za použití barviva nebo příměsi jsou z roku 1905, kdy jistý Slitcher měřil rychlost a směr povrchové vody. Nicméně více se tato metoda začala používat až po roce 1963, kdy vědci Feuerstein a Selleck sledovali proudění pomocí fluorescenčních barviv [68]. Použití této metody pro analýzu proudění v rotujícím packingu by bylo možné, nicméně tato metoda je vhodná spíše pro analýzu spojitého proudění, které se však v rotačních ložích téměř nevyskytuje. Jelikož lze v packingu zajistit dostatečný kontrast mezi kapalinou a výplní, je používání fluorescenčního barviva zbytečné.

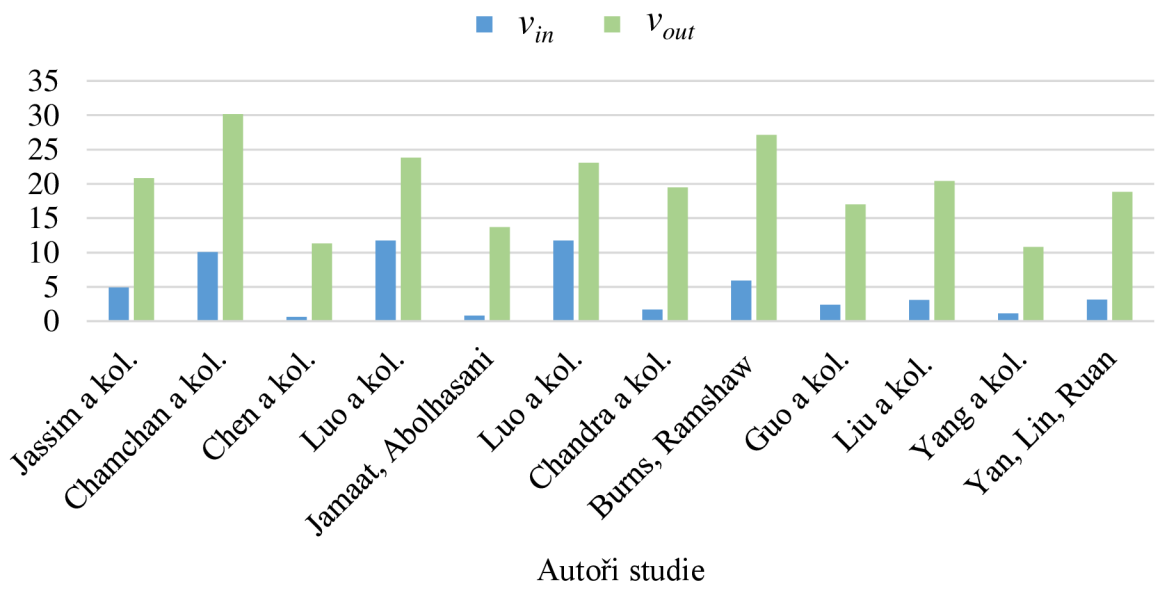
5 Shrnutí stavu poznání

Na základě rešerše byla sestavena Tabulka 1, která uvádí typy výplně sestrojených packingu, jejich vlastnosti a použité provozní režimy. Nejčastěji používaným typem výplně je drátěná síť, z důvodu snadné výroby a možnosti dosáhnout vysokého měrného povrchu. Z těchto studií jen jedna studie uvádí konstrukční řešení vhodné pro optické pozorování kapaliny uvnitř packingu, a to pouze v jeho střední a vnější části. Tuto studii publikoval Liu a kol., viz kapitola 4.1. Ostatní studie používají výplně, ve kterých se nedá opticky mapovat proudění kapaliny uvnitř zařízení. Nicméně lze na jejich základě odvodit provozní režimy pro tuto práci. Nevyplněné údaje v tabulce nebyly ve studii uvedeny nebo byl provoz prováděn pouze s jednou hodnotou.

Tabulka 1 Souhrn studií s experimentálními packingy

Studie	*Typ výplně packingu*	*Průměr výplně [mm]*		*Výška [mm]*	*Měrný povrch [m^{-1}]*	*Otáčky [ot/min]*		*Hm. průtok kapaliny [kg/h]*	
		d_{in}	d_{out}	h	a	n_{min}	n_{max}	m_{min}	m_{max}
Jassim a kol. [9]	Drátěná síť	156	398	25	2132	600	1000		2424
Chamchan a kol. [10]	Drátěná síť	120	360	60	246,1		1600	110	130
Chen a kol. [28]	Tělíska	20	120	20	683 až 2074	600	1800	18,6	61,8
Luo a kol. [29]	Drátěná síť	156	316	50			1440		
Jamaat, Abolhasani [34]	Přepážky	39	138	37		400	1900	75	150
Luo a kol. [35]	Přepážky + pórovité prstence	156	306	50	500		1440		
Chandra a kol [36]	Rozdělené přepážky	81	310	30	1180 a 1700	400	1200		
Burns, Ramshaw [48]	PVC pěna	70	320	100	1500		1620		658,8
Guo a kol. [49]	Drátěná síť	252	452	45	469 a 500	180	720		
Liu a kol. [53]	Drátěná síť a samostatné drátky	147	325	50	2033 a 73	400	1200	25	45
Yang a kol. [57]	Drátěná síť a kovová pěna	42 a 35	82 a 78	20	497 a 1098	500	2500	65,7	154,8
Yan, Lin, Ruan [58]	Tělíska	100	300	30	2500	600	1200		100

Na základě vnitřního a vnějšího průměru výplně d_{in} a d_{out} a rozsahu provozních otáček n_{min} až n_{max} lze stanovit velikosti obvodových rychlostí na začátku v_{in} i konci packingu v_{out}. Tato hodnota udává, s jakou razancí bude kapalina tříštěna výplní packingu. V uvedených rotačních ložích se v_{in} pohybují od 0,6 m/s do 11,8 m/s a v_{out} od 10,8 m/s do 30,2 m/s, viz Graf 1. Nejvyšších v_{in} bylo dosaženo ve studiích, kde byly použity pouze jedny n. Při porovnání studií, ve kterých byly zkoumány režimy s různými n bylo dosaženo nejvyšší v_{in} 4,9 m/s. Transparentní packing řešený v této práci by měl dosahovat podobných hodnot obvodové rychlosti.



Graf 1 Obvodové ryhclosti experimentálních packingů

Vzhledem k definovanému rozsahu provozních otáček daným testovacím zařízením, viz kapitola 7, a rozsahu obvodových rychlostí zvolených na základě rešerše, lze určit rozměry výplně packingu. Hodnoty, které uvádí Tabulka 2, jsou orientační a slouží spíše k nastínění, jakých rozměrů bude dosahovat finální transparentní packing.

Tabulka 2 Orientační parametry transparentního packingu

v_{in} *[m/s]*	2
v_{out} *[m/s]*	30
n_{min} *[ot/min]*	300
n_{max} *[ot/min]*	1 800
d_i *[mm]*	127
d_{out} *[mm]*	318

Pro optické měření vychází jako nejlepší alternativa packing ze samostatných drátů. V potaz lze brát i packing s koncentrickými prstenci z drátěné sítě, ovšem u této výplně je problém s dráty ležícími kolmo k ose rotace. Tyto dráty při optickém měření leží v zákrytu a překážely by při měření v různých axiálních hloubkách. Současně je zde problém při tvorbě

2D simulací, jelikož síť nelze korektně namodelovat pouze ve dvou dimenzích. Tento problém řeší packing s výplní ze samostatných drátů, který má v celé axiální výšce stejnou geometrii. Tato konstrukce umožňuje mapovat proudění a rozpad na jednotlivých příčných drátech bez vlivu koncentrický drátů jak optickou metodou, tak pomocí 2D a 3D modelování. Oproti koncentrickým prstencům z drátěné sítě je sestavení tohoto packingu jednodušší, jelikož se dráty dají vkládat do packingu jednotlivě, ovšem na úkor velké časové náročnosti sestavení. Při konstrukci prstencového packingu by se prstence nejprve musely všechny upnout ke spodní nosné části a poté být přiklopeny a spojeny s vrchní částí packingu. To by znamenalo zasunutí velkého počtu drátů do příslušných děr s malou tolerancí v jeden okamžik.

Současně byla tato práce tvořena v rámci česko-polském projektu označeného GF21-45227L s názvem *„Holistický přístup k procesu absorpce v rotačním loži (RPB) s využitím 3D CFD, vizualizačních experimentů a experimentů přenosu hmoty“*. V projektu je pozornost zaměřena mimo jiné na počítačové modelování, které má být validováno pomocí optických měření. Zatímco český tým na VUT se zaměřuje především na optické měření a simulace, polský tým na univerzitě v Lodži je více orientován na hodnocení kvality absorpce packingů.

6 Konstrukce transparentního packingu

V první části práce byla představena absorpční zařízení se zaměřením na rotační lože. Dále byly představeny typy packingů a možnosti zobrazení charakteru proudění ve vnitřní části rotačního lože. Druhá část práce se věnuje návrhu, konstukci a následnému testování transparentního packingu pro optické mapování proudění kapaliny.

Jak již bylo zmíněno, byl zvolen packing se samostatnými dráty. Toto řešení je vhodné pro optické mapování kapaliny uvnitř packingu současně je levné a snadno zkonstruovatelné. Nevýhodou je dlouhá doba výroby a malá konstrukční houževnatost oproti jiným typům packingů. Z důvodu bezpečnosti a snadné manipulace byla jako pracovní tekutina použita voda. Chování vody v packingu bude podobné, jako chování roztoku MEA a vody, což je běžně používaný absorbent. Je to důsledek relativně podobné reologie obou kapalin. V rámci práce není řešena absorpce v packingu z chemického hlediska. Práce se zabývá popsáním charakteru proudění, který má na absorpci zásadní vliv.

6.1 I. iterace

Po vybrání vhodného typu packingu následovala volba materiálů a konstrukce výplně. Požadavky na packing byly následující:

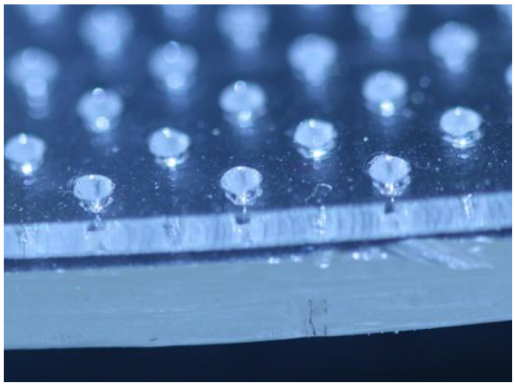
- Transparentnost – jelikož se packing bude používat pro optické měření, musí být v axiální ose průhledný
- Konstrukční houževnatost – samonosný packing musí vydržet provozní otáčky v řádech stovek otáček za minutu
- Kompatibilita packingu – bylo by vhodné, aby finální packing bylo možné provozovat i na jiných testovacích zařízeních, například na univerzitě v Lodži

Požadavky jsou cíleny hlavně na nosnou část packingu. Jako nosný materiál byl zvolen polymethylmetakrylát (PMMA) neboli plexisklo. Důvodem byla vysoká průzračnost a propustnost světla, houževnatost, tuhost, pevnost a dobrá mechanická opracovatelnost. PMMA je také vhodné pro laserové řezání, kterým byly vyrobeny jednotlivé transparentní části packingu.

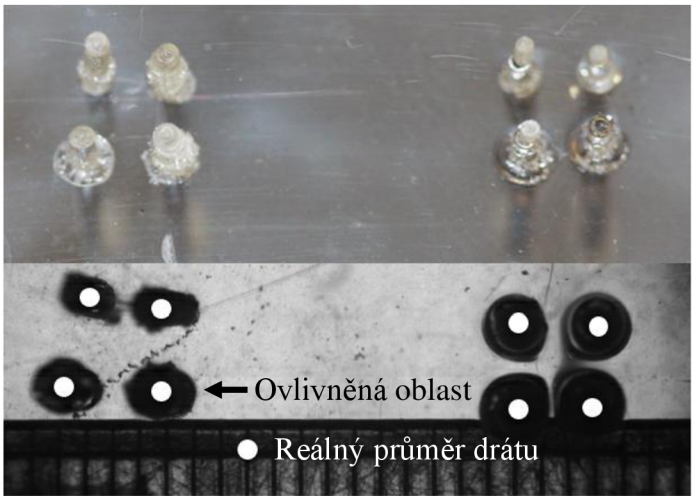
Při volbě výplně packingu bylo uvažováno několik alternativ. První možností bylo použití kovových trubiček, které se používají jako injekční jehly. Výhodou byla menší hmotnost a dostupnost trubiček s vnějšími průměry od 0,3 mm. Packing z trubiček by pak mohl mít menší hmotnost a vyšší měrný povrch výplně. Nevýhodou byla vyšší cena a deformace konců trubiček při krácení na požadovaný rozměr, což by negativně ovlivnilo instalaci trubiček do packingu. Druhou možností bylo použití uhlíkových tyčí, které se používají v modelářství, například jako táhla RC letadel. Výhodou těchto tyčí je nižší cena a dostupnost průměrů od 0,6 mm. Nevýhodou bylo třepení konců trubiček při krácení na požadovaný rozměr a rozdílného smáčivého úhlu mezi kapalinou a tyčí oproti materiálům používaným jako výplň packingu. Poslední a také použitou variantou byly dráty z nerez oceli AISI 304. Hlavní výhodou tohoto řešení byla možnost v budoucnu porovnat packing s výplní z jednotlivých drátů s již zkonstruovaným packingem s výplní z drátěné sítě, která je tvořena stejným materiálem s tloušťkou drátu 0,8 mm. Další výhodou tohoto řešení byla nízká cena a dostupnost nerezových tyčí. Nevýhodou byla dostupnost průměrů od 1 mm.

Poslední částí I. iterace bylo vyřešení upnutí drátů do plexiskla. Díry v plexiskle mohly být vytvořeny buď vrtáním, nebo laserovým řezáním. Při vrtání docházelo k tvorbě malých prasklinek a odlupování povrchové vrstvy plexiskla v oblasti cca 0,5 mm okolo díry, viz Obrázek 10. Vzhledem k tomu, že by toto mechanické poškození by mělo negativní vliv na optické měření, bylo pro vytvoření děr zvoleno laserové řezání, viz Obrázek 11. Pro upnutí drátů do děr bylo uvažováno několik variant. První alternativou bylo aplikování malé dávky lepidla na konce drátu a následné zasunutí do díry v plexiskle. Nevýhodou tohoto řešení byla časová náročnost a také riziko, že při špatném zavedení budou na plexiskle kolem drátu stopy po lepidle. Druhou variantou bylo nahřátí konce drátu a následné zasunutí drátu do díry v plexiskle. Tento způsob tepelně deformoval plexisklo okolo díry. Obě ty to varianty vytvářely okolo děr velkou ovlivněnou oblast o velikosti 0,5 až 1 mm od díry. Výsledky obou zmíněných variant zobrazuje Obrázek 12. Poslední uvažovanou a také použitou možností bylo pouhé vložení drátu do děr a následné zakrytování z obou stran další vrstvou plexiskel. Toto řešení umožňovalo výrazně vyšší rychlost sestavení výplně oproti dříve zmíněným variantám. Nevýhoda řešení spočívala ve vyšší náchylnosti na vysunutí drátu z plexiskla, a tedy nutnosti dbát vyšší opatrnosti při manipulaci s packingem.

Obrázek 10 Vrtané díry



Obrázek 11 Laserem vyřezané díry



Obrázek 12 Porovnání reálné podoby děr (vrchní část) a záznamu z vysokorychlostní kamery (spodní část) – vlevo dráty vlepené do plexiskla, vpravo dráty vtavené do plexiskla

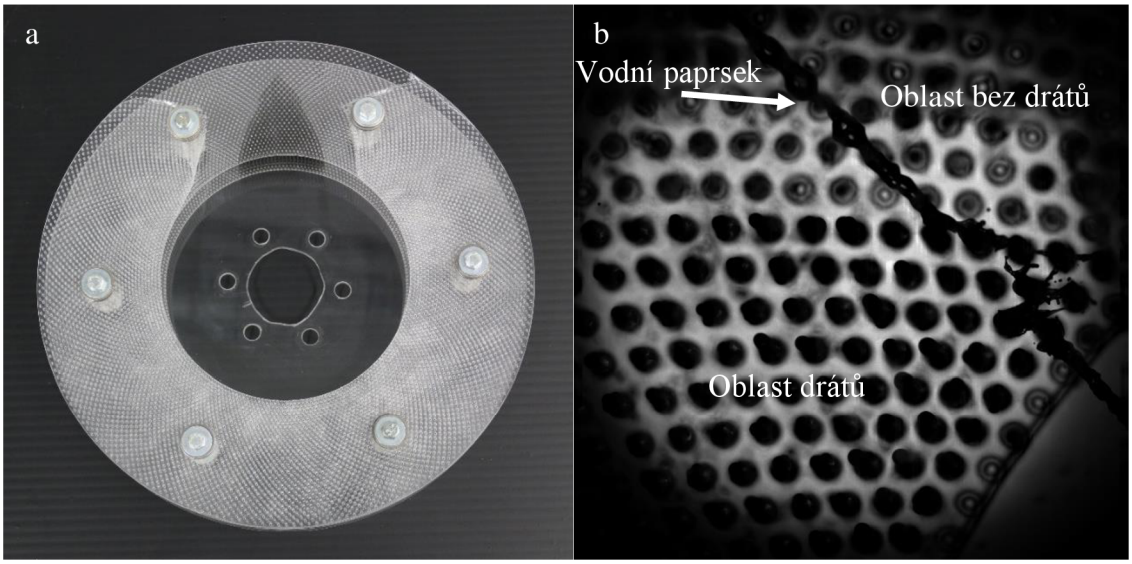
6.2 II. iterace

Druhá iterace spočívala v konstrukci celého packingu a prvním testům při rotaci. Průhledná část packingu se skládala ze dvou identických plexiskel s dírami a jednoho nosného plexiskla. Plexiskla byla stažena 6 šrouby na průměru 225 mm vedoucími přes celou výšku packingu. Rozteč 30 mm mezi plexiskly s dírami zajišťovaly kovové distanční sloupky navlečené na šroubech. Plexiskla s dírami o vnitřním průměru 150 mm a vnějším průměru 300 mm byla 1 mm tlustá. Obě plexiskla měla vyřezané díry na 37 kružnicích s d_{in} 152 a d_{out} 296 mm. Na každé kružnici bylo 208 děr o průměru 1 mm. Díry na kružnicích byly rozmístěny tak, aby vždy v mezeře mezi dvěma dírami na jedné kružnici následoval v další kružnici drát. Úhel mezi dvěma po sobě jdoucími dírami v radiálním směru pak byl 0,87 °. Nosné plexisklo tlusté 3 mm o vnitřním průměru 46 mm a vnějším průměru také 300 mm mělo na průměru 72 mm 6 děr o průměru 10 mm pro upevnění příruby spojující packing a hřídel rotačního zařízení.

Do plexiskel s dírami byly vkládány nerezové tyče diskutované v kapitole 6.1 o délce 32 mm. Tyče byly na požadovanou délku stříhány nůžkami na plech. Po střihu se na tyčích objevovaly stržené hrany, které by mohly negativně ovlivnit usednutí drátů do děr. Konce tyčí proto byly zbroušeny na kotoučové brusce.

Packing II. iterace byl výrazně zjednodušen oproti zamýšlené koncepci. Důvodem bylo, že hlavní cíl této iterace spočíval ve zjištění, zda bude vůbec možné opticky zkoumat chování kapaliny v packingu. Hrozilo totiž, že se kapalina na prvních řadách drátů roztříští natolik, že výrazně zanese plexiskla a nebude možné přesně sledovat chování kapaliny mezi plexiskly. První testy toto tvrzení vyvrátily a průhlednost packingu byla dobrá i po delší době provozu.

První zjednodušení konstrukce packingu spočívalo v umístění stahovacích šroubů a distančních válečků přímo do prostoru packingu, díky tomu byl ušetřen materiál a packing měl jednodušší konstrukci bez druhého nosného plexiskla. Dalším zjednodušením bylo vyplnění pouze malé části packingu dráty. Bylo vsunuto pouze cca 250 nerezových tyčí (asi 3 % z celkového počtu), viz Obrázek 13a. Vzhledem k požadavkům na testy byla tato oblast dostatečná. Při testech v rotačním zařízení byla pro přívod kapaliny použita jedna plain orifice tryska, viz kapitola 7.2.2. Při těchto testech nebyl měřen m. Kapalina byla dávkována odhadem v režimech s nízkým, středním a vysokým m. Packing byl testován na n = 200–1 400 ot/min. Obrázek 13b zobrazuje tříštění proudu kapaliny při vstupu do části packingu s dráty.



Obrázek 13 Packing II. iterace, a) fotka celého packingu; b) fotka z vysokorychlostní kamery při 400 ot/min

Tento packing fungoval velice dobře a testy potvrdily, že kontaminace plexiskel kapalinou není tak značná, aby znemožnila optické pozorování kapaliny uvnitř packingu.

6.3 III. iterace

Finální iterace se oproti předešlé výrazně lišila. Hlavní rozdíl byl v konstrukčním řešení stažení celého packingu do jednoho celku. Rozměry byly také lehce upraveny, hlavně proto, aby finální packing bylo možné použít i na jiných zařízeních, ne pouze na testovacím zařízení v Laboratoři sprejů. Nicméně základní konstrukční princip, tedy vkládání drátů do laserem vypálených děr, zůstal stejný.

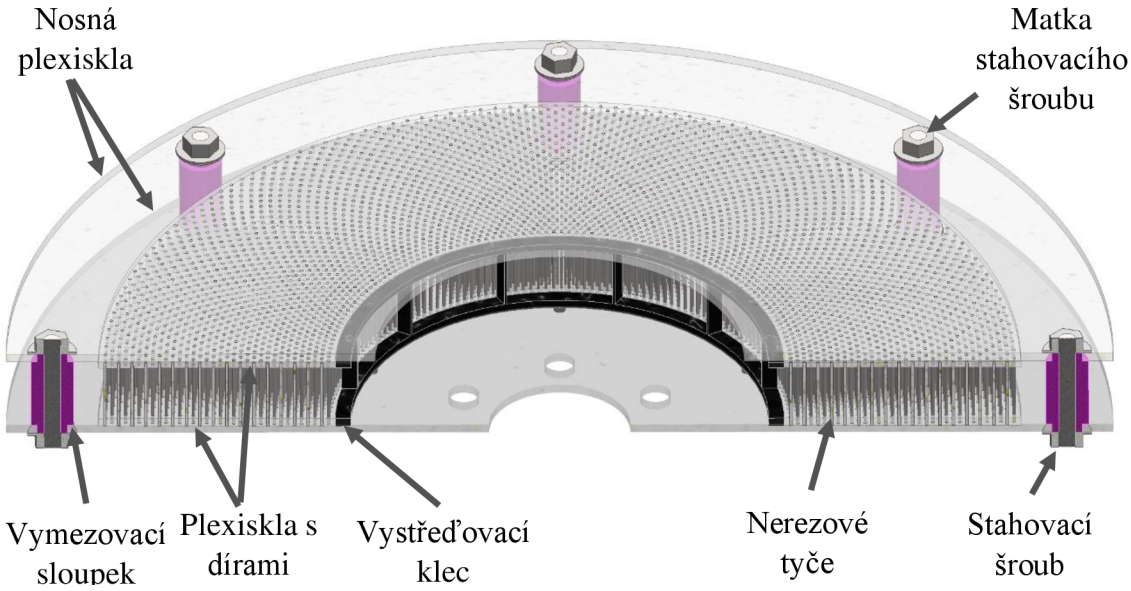
Poslední iterace packingu se skládala ze dvou děrovaných a dvou nosných plexiskel. Obě plexiskla s dírami měla vnitřní průměr 146 mm a vnější 300 mm. Tloušťka spodního plexiskla s dírami byla 3 mm, vrchního pak 2 mm. Díry nesoucí výplň packingu byly rozděleny do 34 kružnic s krajními rozměry d_{in} = 150,4 mm a d_{out} = 295,6 mm. Každá kružnice obsahovala 192 děr. Díry byly uspořádané jako v II. iteraci. Spodní nosné plexisklo o vnitřním průměru 42 mm, vnějším průměru 360 mm a tloušťce 3 mm mělo stejně jako v předešlé iteraci 6 děr pro upnutí packingu přes přírubu k hřídeli. Navíc toto plexisklo mělo na průměru 141 mm 6 děr o průměru 4 mm pro vsazení vystřeďovací klece, viz dále. Díry pro stahovací šrouby o průměru 10 mm byly vyřezány na průměru 330 mm. Vrchní plexisklo o vnitřním průměru 120 mm mělo vnější průměr, tloušťku a rozmístění děr pro stahovací šrouby stejné jako spodní.

Do plexiskla s dírami byly zasunuty stejné nerezové dráty jako v předešlé iteraci, ovšem v tomto případě byla jejich délka pouze 24,5 mm. Délka byla upravena na tuto hodnotu pro dosažení výšky packingu h = 20 mm. Zkrácení drátů zmenšilo h a umožnilo použití packingu i na jiných testovacích zařízeních. Menší h současně znamená i vyšší riziko znečištění plexiskel kapalinou a zhoršení průhlednosti. Finální packing dosáhl měrné plochy a = 185,53 m^2/m^3, což je více jako dvojnásobná a v porovnání s jediným konstrukčně srovnatelným packingem diskutovaným v kapitole 5.

Soustřednost spodního nosného plexiskla a plexisklel s dráty zajišťovala vystřeďovací klec. Jelikož byla klec jediný díl, který fixoval plexiskla s vloženými dráty v ose rotace, byly

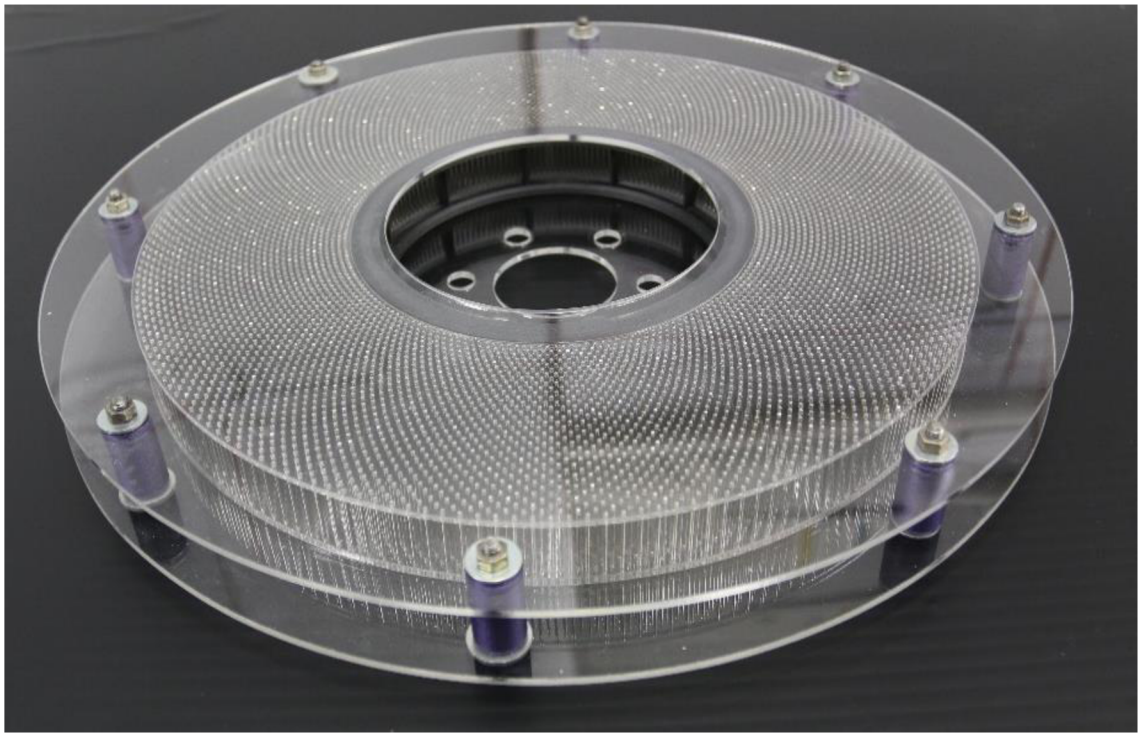
na ni kladeny vyšší pevnostní nároky. Tento díl byl vytištěn na 3D tiskárně z kompozitního polykarbonátu, který má oproti jiným tiskovým materiálům vyšší pevnost a tuhost. Klec s vnitřním průměrem 136 mm, vnějším průměrem 146 mm a celkovou výškou 27,5 mm se díky kolíkům na spodní straně o výšce 2,5 mm zasunula do spodního nosného plexiskla, a zajistila tak soustřednost výplně packingu s hřídelí testovacího zařízení.

Horní nosné plexisklo bylo skrze 8 vymezovacích sloupků sešroubováno se spodním nosným plexisklem. Sloupky byly opět vytištěny na 3D tiskárně. Jelikož na sloupky nebyly kladeny tak velké pevnostní nároky, byly vytištěny z levnějšího materiálu z PLA (kyseliny polymléčné). Stažením výplně nosnými plexiskly byly všechny nerezové tyče volně vložené do děr zajištěny proti axiálnímu pohybu. Řez modelem sestaveného packingu zobrazuje Obrázek 14.



Obrázek 14 Řez modelem packingu III. iterace

Jednotlivé díly z plexiskla a 3D tisku byly vyrobeny za relativně krátký čas. Nerezové tyče se díky možnosti krátit na požadovanou délku až 20 kusů tyčí na jeden střih vyráběly také poměrně rychle. Následné obrušování stržených hran zabralo více času. Časově nejnáročnější však byla finální kompletace. U packingu II. iterace byla plexiskla, do kterých se vkládaly dráty zafixované šrouby v distančních sloupcích. Byla tedy zajištěna kolmost vsunutých drátů k plexisklům. U této iterace byly mezi plexiskly s dírami pouze dráty. Soustřednost obou plexiskel zajišťovala následně vsunutá vystřeďovací klec. Aby bylo vůbec možné začít konstruovat výplň packingu, bylo nutné vyrobit pomocné vystřeďovací dílce, které fixovaly plexiskla s dírami ve správné poloze a mohly do nich být vsunuty nerezové tyče. Tyto dílce byly opět vyrobeny pomocí 3D tisku z PLA. Zasouvání nerezových tyčí byla časově nejnáročnější část. Vzhledem k rozměrům packingu a preciznosti operace bylo vyloučeno, že by drátky zasouvalo více osob současně. Samotné vkládání nerezových tyčí tedy zabralo jedné osobě přibližně 40 hodin čistého času. Finální podobu sestaveného packingu zobrazuje Obrázek 15.



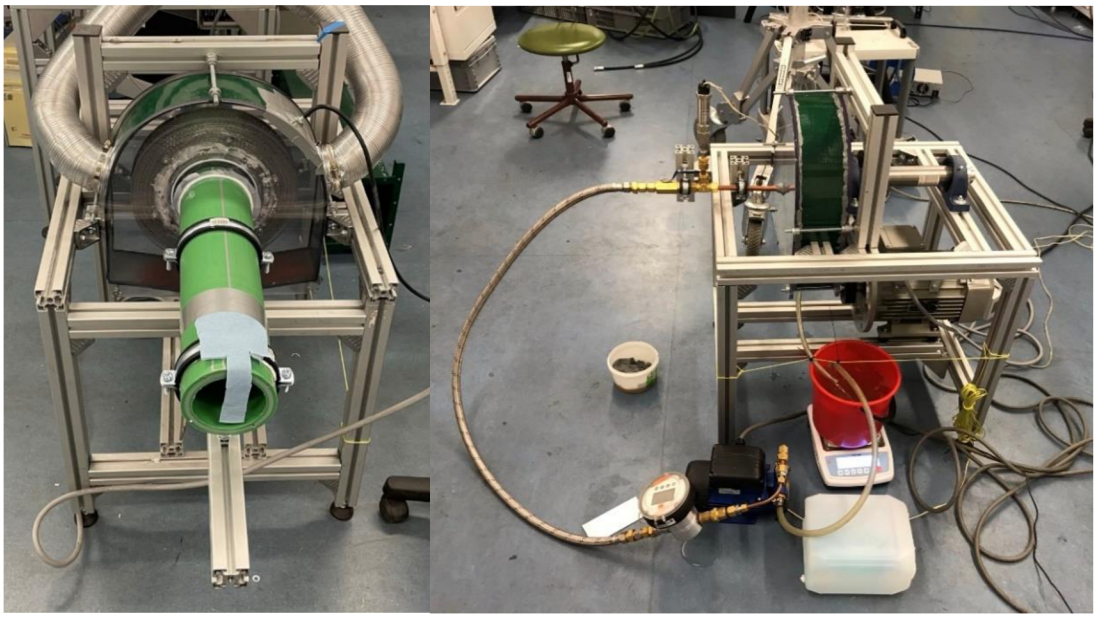
Obrázek 15 Reálná podoba packingu III. iterace

7 Testovací zařízení

Funkčnost packingů II. a III. iterace byla ověřována na testovacím zařízení v Laboratoři sprejů na FSI VUT. Toto zařízení bylo sestaveno již dříve v rámci už zmíněného česko-polského projektu. Zařízení bylo konstruované pro ověření koncepce rotačního absorbéru. Zařízení bylo doposud využíváno pro optickou analýzu pouze proudění vystupujícího z packingu. V zařízení byly doposud testovány dva strukturované packingy, jeden tvořen hustě namotanou drátěnou sítí a druhý kovovou pěnou. Ani jeden z packingů není z důvodu vysoké hustoty výplně vhodný pro optickou charakteristiku vnitřního proudění.

7.1 Popis původního zařízení

Nosná konstrukce zařízení se skládala z hliníkových profilů s modulovým rozměrem řezu 45×45 mm a drážkami tvaru BH 45-10. Pohonnou jednotkou zařízení byl 50Hz elektromotor MOLL-MOTOR IE o výkonu 3 kW. Otáčky motoru byly regulovány 3kW frekvenčním měničem A550 PLUS od VYBO Electric a.s. Motor byl s hřídelí spojen přes ozubený řemen. Hřídel byla uložena ve dvou axiálních ložiscích SKF SY508 M. Stacionární kryt packingu byl tvořen z tenkého plechu a dvou plexiskel, viz Obrázek 16. Okraje plechové části krytu byly potaženy těsnicí gumou a přes 5 šroubů k nim byly přichyceny plexiskla. Pracovní kapalina byla přiváděna zaslepenou měděnou trubkou s vyvrtanými dírami v radiálním směru. Upnutí packingu k hřídeli bylo řešeno přes přírubu, která byla zajištěna hřídelovou maticí KM.



Obrázek 16 Původní konstrukce testovacího zařízení

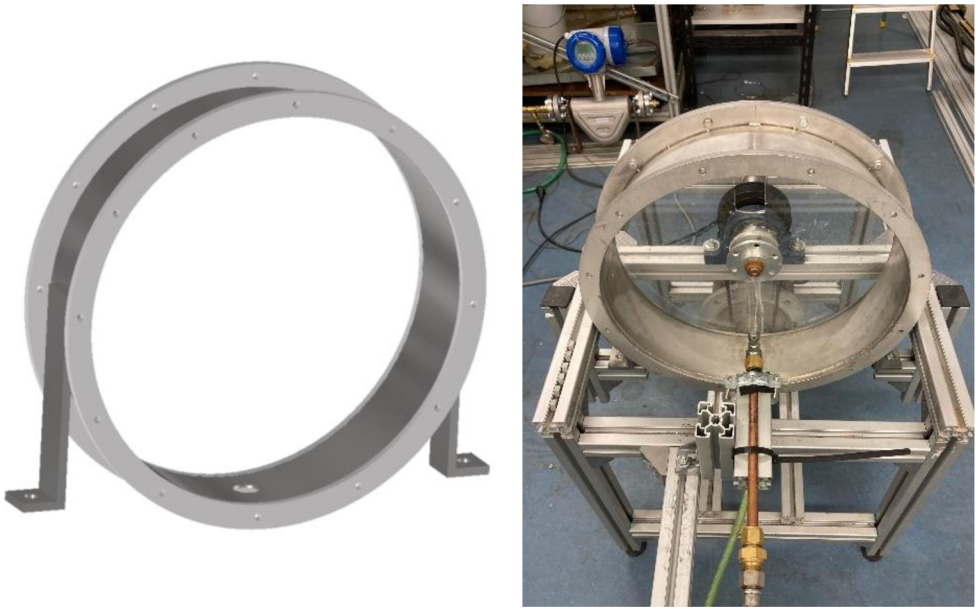
7.2 Provedené úpravy

Dříve testované packingy na tomto zařízení byly v porovnání se sestavenými transparentními packingy výrazně pevnější a houževnatější a při provozu nehrozilo nebezpečí jejich roztříštění. U experimentální packingů k roztříštění nebo rozpadnutí dojít mohlo. Současně ani přívod pracovní kapaliny do RPB nebyl ideální. Z těchto důvodů byly na testovacím zařízení provedeny úpravy, které poskytovaly vyšší bezpečí, těsnost a rovnoměrnější distribuci kapaliny.

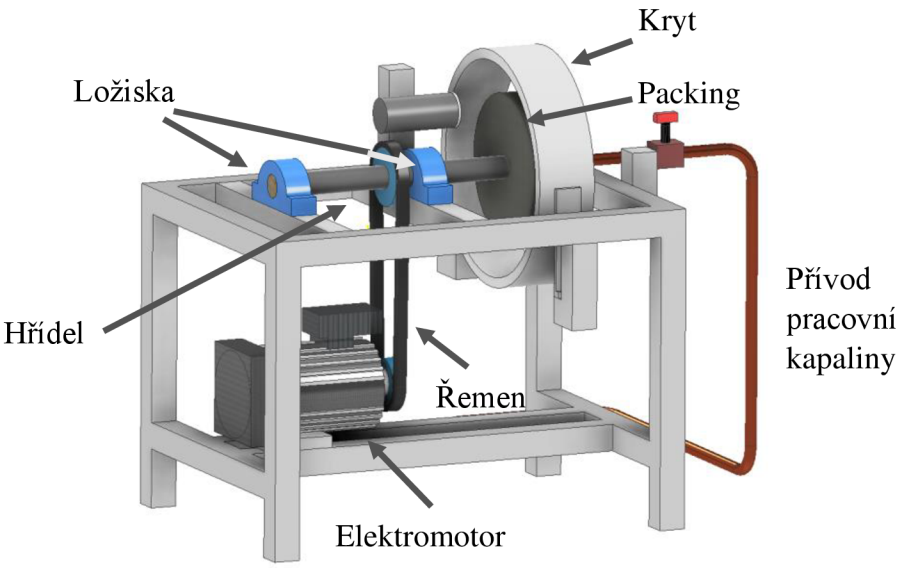
7.2.1 Kryt

Úprava se týkala stacionárního krytu packingu, který nezajišťoval dostatečnou těsnost a houževnatost. Těsnost jako taková sice nemá vliv na experimenty diskutované v této práci, nicméně pro další plánované experimenty jako analýza proudění kapaliny v RPB při protiproudém proudění vzduchu a absorpce CO_2 v RPB je nezbytná. Přívod vzduchu, případně CO_2, bude proveden skrz otvor na kraji čelního plexiskla. Vývod plynu bude v ose rotace packingu přes hřídelové těsnění připevněné na nosném plexiskle. Při experimentech prováděných v této práci nebyl přiváděn do packingu žádný plyn, není proto popisu tohoto řešení věnována další pozornost.

Nová konstrukce krytu byla tvořena z nerezové oceli a dvou plexiskel. Okraje byly tvořeny stočenou nerezovou pásovinou tloušťky 3 mm, ke které byly přivařeny dvě příruby tloušťky 10 mm o vnitřním průměru 444 mm a vnějším 500 mm s celkem 12 dírami o průměru 8 mm pro uchycení plexiskel vyvrtaných na průměru 472 mm. Plexiskla tloušťky 5 mm měla vnitřní průměr 40 mm, vnější průměr 500 mm a díry pro uchycení na nerezové příruby. Kryt byl pomocí nožiček přimontován přímo k nosné konstrukci z hliníkových profilů. Na spodní straně byla navržena díra se závitem pro snadné připojení hadice k odvodu pracovní kapaliny.



Obrázek 17 Upravená konstrukce krytu RPB



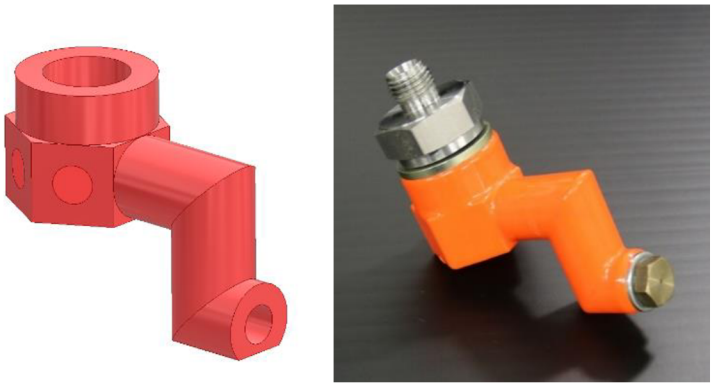
Obrázek 18 Finální podoba testovacího zařízení

7.2.2 Distributory kapaliny

Problém nahrazení zaslepené trubky s dírami distributorem, byl v prostoru. Požadavkem bylo, aby distributor mířil do poloviny *h*. Tomu však bránily upínací šrouby spojující packing s nosnou přírubou na hřídeli. Hlavy těchto šroubů byly částečně obroušeny, aby bylo možné distributor umístit do požadované pozice. Výsledný tvar obou rozdělovačů kapaliny pak vychází ze snahy co nejvíce zvýšit mezeru mezi rychle rotujícími upínacími šrouby a distributory. Přes veškerou snahu bylo dosaženy mezery v axiálním směru přibližně 2 mm.

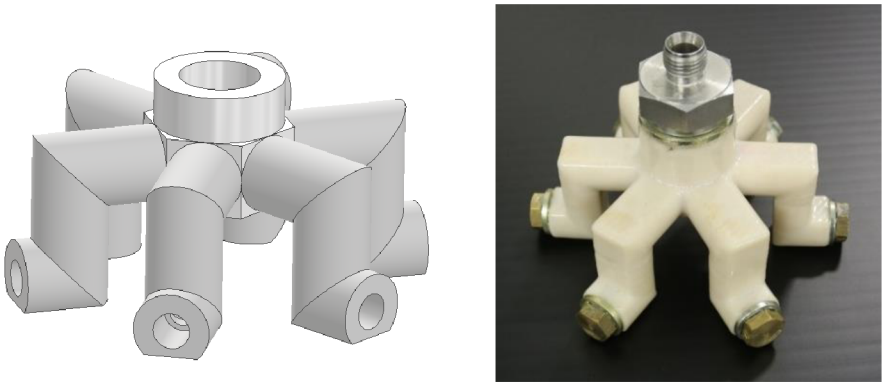
Oba rozdělovače byly vytištěny na 3D tiskárně z materiálu ASA (akrylonitril styren akryl). Tento materiál má tu výhodu, že lze vyhlazovat acetonem, který model lehce naleptá a vyhladí všechny netěsnosti. Do distributorů byly vyřezány závity a zašroubovány mosazné zátky s vyvrtanými dírami, které fungovaly jako plain orifice trysky. Distributory byly připojeny pomocí matice se zářezným prstenem na nosnou měděnou trubku, která byla uchycena na testovacím zařízení. Jako těsnění byly použity těsnící kovové kroužky s pryžovým břitem.

První z nástavců, viz Obrázek 19, měl pouze jeden výstupní otvor o průměru 1,2 mm. Tento nástavec má oproti druhému distributoru menší výstupní otvor pro dosažení vyšších výstupních rychlostí kapaliny u_0 i při nízkém *m*. V rámci práce je uvažováno, že rychlost kapaliny na vstupu do výplně packingu byla stejná jako u_0, jelikož vzdálenost od ústí trysky k výplni byla pouze 20 mm. Tento přípravek se používal při testování packingu II. iterace a při testování finálního packingu s makroskopickým objektivem.



Obrázek 19 Model pro 3D tisk a reálná podoba distributoru kapaliny s jednou tryskou

Druhý distributor, viz Obrázek 20, byl koncipován jako hlavní rozdělovač pro testování. Rozdělovač disponoval celkem šesti plain orifice tryskami o průměru 1,44 mm. Nevýhodou tohoto rozdělovače byla neschopnost rovnoměrného přívodu kapaliny při režimech s nižšími u_0. Provoz tohoto přípravku byl možný až od m = 44 kg/h, což odpovídá u_0 = 1,25 m/s. Při nižších u_0 docházelo ke kolapsu proudů kapaliny mířících vzhůru dříve, než se dostaly do packingu.



Obrázek 20 Model pro 3D tisk a reálná podoba distributoru kapaliny se šesti tryskami

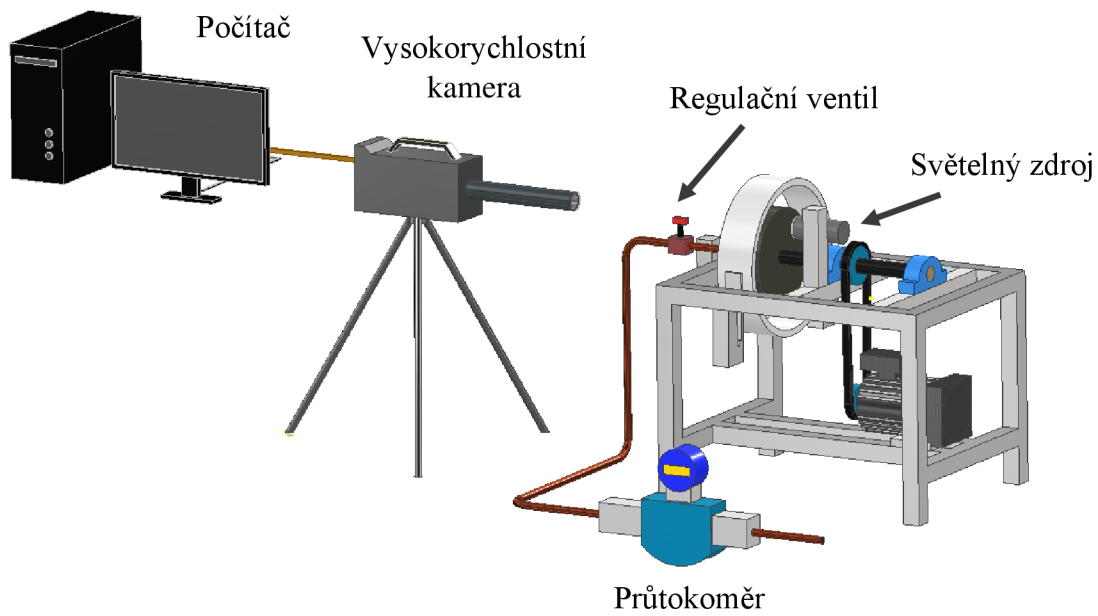
8 Ověření funkčnosti transparentního packingu

Po nutných úpravách testovacího zařízení, řešených v minulé kapitole, bylo možné začít ověřovat funkčnost finálního packingu. Tato kapitola se věnuje popisu měřicí tratě použité při měření s packingem a použitým provozním režimům.

Ověření odolnosti packingu při vyšších n bylo provedeno bez pořizování jakýchkoli záznamů. První zkouška transparentnosti packingu také nebyla testována nijak systematicky, pouze rychlou zkouškou s neznámým m a na středních n.

Jelikož oba testy dopadly pozitivně, byla provedena dvě měření s vysokorychlostní kamerou zaměřená na mapování proudění v packingu. Při prvním měření byla zaznamenávanou oblastí celá šíře packingu, kdežto při druhém byl sledovanou oblastí pouze začátek výplně packingu. Provozní režimy i distributory kapaliny byly u obou měření rozdílné.

Pro účely této práce bylo s packingem zaznamenáno celkem 22 provozních režimů. S packingem se následně prováděly i další experimenty s vysokorychlostní kamerou analyzující chování kapaliny s různými n a u_0. Tato měření byla prováděna v rámci dříve zmíněného česko-polského projektu.

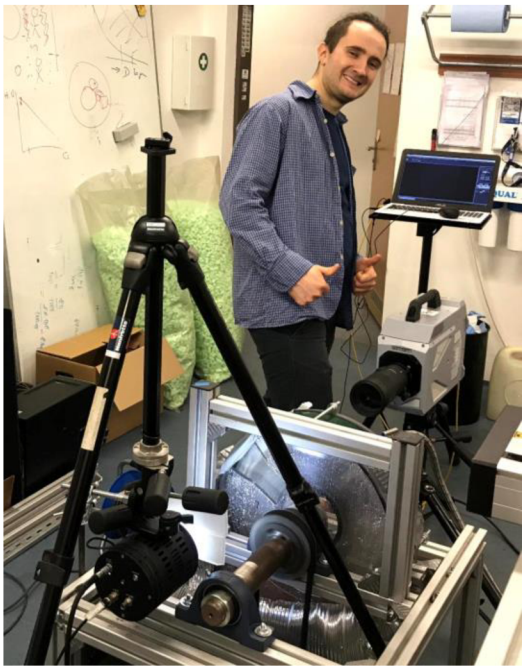


Obrázek 21 Schéma měřicí trati

8.1 Vysokorychlostní kamera

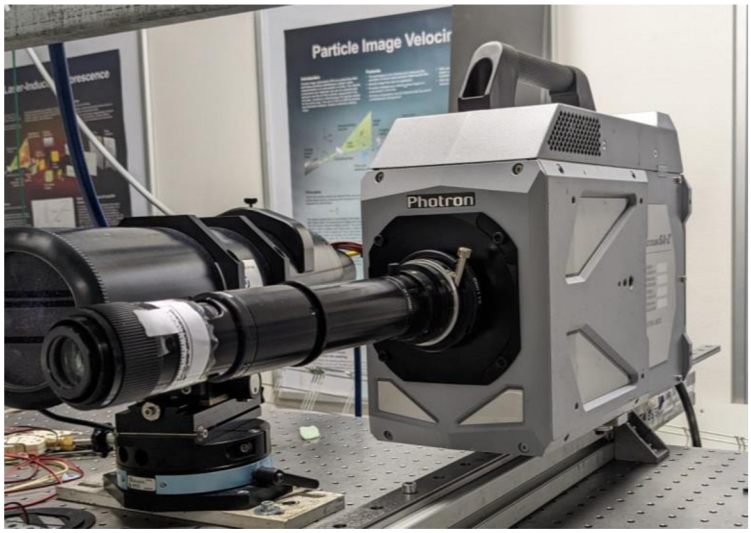
Pro optické měření byla použita vysokorychlostní kamera FASTCAM SA-Z společnosti Photron. Tato kamera umožňuje pořídit až 2 100 000 snímků za sekundu, ovšem pouze za sníženého rozlišení 128 × 8 pixelů. Při měření byla použita rychlost snímání 20 000 snímků za sekundu s rozlišením 1024 × 1024 pixelů. Pro kvalitní vyhodnocení je třeba docílit takového nastavení kamery, aby kapičky a další struktury kapaliny byly zachyceny alespoň na 10 snímcích. Při uvažování menší zaznamenávané oblasti (viz dále) a maximální rychlosti kapaliny, která by měla odpovídat maximální obvodové rychlosti drátů packingu v zaznamenávané oblasti, bude s tímto nastavením kamery průchod kapaliny zaznamenávanou oblastí zachycen alespoň na 25 snímcích.

Pro zachycení větší oblasti packingu byl použit makroskopický objektiv od výrobce Sigma, 180 mm f/2,8 APO MACRO DG HSM. Zaznamenávaná oblast byla 52 × 52 mm s rychlostí závěrky 1/2880000 sekundy. Při měření s tímto objektivem byl použit světelný LED panel od společnosti Integrated Design Tool. Jelikož se tento zdroj skládal z celkem 19 LED svítilen, byl před něj umístěn světelný difuzor, aby LED svítilny působily jako plošný zdroj světla. Vzhledem k rozměrům světelného zdroje nebylo možné jej upnout přímo k testovacímu zařízení. Pro umístění světla byl proto použit teleskopický stativ, stejně jako u kamery. Největší komplikací bylo zajištění souososti kužele světla, výplně packingu a objektivu kamery. Se stativem světelného zařízení nebylo možné hýbat z důvodu prostorových omezení, případná korekce souososti byla proto prováděna posuvem kamery a polohovacím systémem stativu kamery.



Obrázek 22 Měření s makroskopickým objektivem

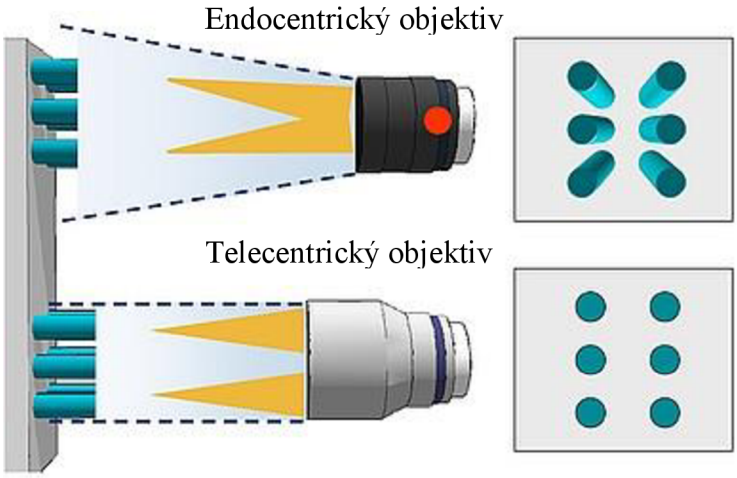
Pro detailní zobrazení kolize kapaliny a drátu v packingu byl použit mikroskopický objektiv na dlouhou vzdálenost 12X Zoom lens od společnosti NAVITAR. Tento objektiv se skládal z 2X F-mount adaptérem (1-62922), 12mm F.F přibližovací čočkou (1-50486) a čočkou 0,25X (1-50011). S tímto nastavením kamery a použitým objektivem byla zaznamenávaná oblast 25,4×25,4 mm s rychlostí závěrky 1/266667 sekundy. Při měření s tímto objektivem byl použit pulzní LED světelný zdroj HPLS-36DD18B od společnosti Lighspeed Technologies. Délka jednoho světelného pulzu byla 400 ns. Světelný zdroj byl připevněn na hliníkovém profilu na testovacího zařízení co nejblíže packingu. Největší komplikací bylo opět zajištění souososti kužele světla, výplně packingu a objektivu kamery. Kamera byla umístěná na opět teleskopickém stativu, zatímco světelný zdroj byl uchycen na nosné konstrukci testovacího zařízení. Korekce souososti se prováděly pomocí polohovacího systému stativu kamery.



Obrázek 23 Vysokorychlostní kamera Photron s mikroskopickým objektivem

Oba použité objektivy byly endocentrické, tedy zachytávající světlo ze všech stran pod různými úhly. Následkem toho dochází k perspektivnímu zkreslení obrazu, viz Obrázek 24, které roste se zvětšující se vzdáleností od optické osy. Telecentrické objektivy, které snímají pouze rovnoběžné paprsky světla s optickou osou, tento jev eliminují. Navíc mají konstantní zvětšení a větší hloubku ostrosti, ovšem na úkor výrazně vyšší ceny oproti objektivům endocentirckým. Pro základní analýzu proudění v rotačním loži byly endocentrické objektivy dostačující, nicméně pro přesnou analýzu proudění zaměřenou hlavně na stanovení velikostí kapek a plochy pokryté kapalinou, je telecentrický objektiv nutný.

Při srovnání velikosti drátů na záznamu s makroskopickým objektivem, jsou dráty na okraji zaznamenávané oblasti výrazně eliptické a zaujímají až dvojnásobnou plochu oproti drátům blíže optické ose. U mikroskopického objektivu tento jev není tak výrazný, avšak i přesto lze na okraji zaznamenávané oblasti pozorovat zkreslení obrazu.



Obrázek 24 Srovnání záznamu endocentrickým a telecentrickým objektivem [69]

8.2 Průtokoměr

Pro monitorování *m* do zařízení byl použit Coriolisův průtokoměr OPTIMASS 6400C S10 od německé společnosti Krohne. Toto zařízení disponuje přesností ±0,1 % z měřené hodnoty průtoku. Průtokoměr byl pryžovou hadicí napojen na rozvod pitné vody v Laboratoři sprejů. Z průtokoměru byla vedena kovová hadice k sedlovému ventilu, který fungoval jako regulační prvek pro úpravu *m* kapaliny. Regulační ventil byl spojen s distributorem kapaliny měděnou trubicí. Ta byla přichycena ke konstrukci testovacího zařízení a sloužila jako nosič distributoru kapaliny.

Obrázek 25 průtokoměr Krohne

8.3 Provozní režimy

Měření byla prováděna při různých u_0 pracovní kapaliny a *n*. Zaznamenány byly vždy všechny kombinace těchto dvou parametrů. Při prvním měření byly hodnoty parametrů, viz Tabulka 3, voleny bez hlubší rešerše používaných provozních režimů. Toto měření sloužilo k ověření transparentnosti lože při provozu a zhodnocení chování kapaliny při průchodu celým packingem. Pro přívod kapaliny byl použit distributor s jednou tryskou. Při druhé sérii byly *n* zvoleny na základě rešerše studií zabývajících se prouděním v rotačních ložích. V dohledaných studiích se *n* packingů se srovnatelnými rozměry pohybovaly v rozmezí od 400 do 1620 ot/min. Pro analýzu proudění na začátku packingu byly vybrány *n* od 300 do 1800 ot/min, což v zaznamenávané oblasti odpovídá minimální v_{in} = 3,1 m/s a v_{out} = 18,8 m/s. Při režimech s n_{max} dosahuje na konci packingu v_{out} = 27,8 m/s, což je více než ve většině studií uvedených v kapitole 5. Množství přiváděné kapaliny bylo zvoleno na základě u_0, které se pohybovaly od 1,25 m/s do 5 m/s, viz Tabulka 4.

Tabulka 3 Provozní režimy pro vizualizaci proudění napříč celým packingem

n [ot/min]	400; 800; 1200
u_0 *[m/s]*	7,8; 11,5
m [kg/h]	28; 47

Tabulka 4 Provozní režimy pro analýzu proudění na začátku výplně packingu

n [ot/min]	300; 600; 1200; 1800
u_0 *[m/s]*	1,25; 2,50; 3,75; 5,00
m [kg/h]	44; 88; 132; 176

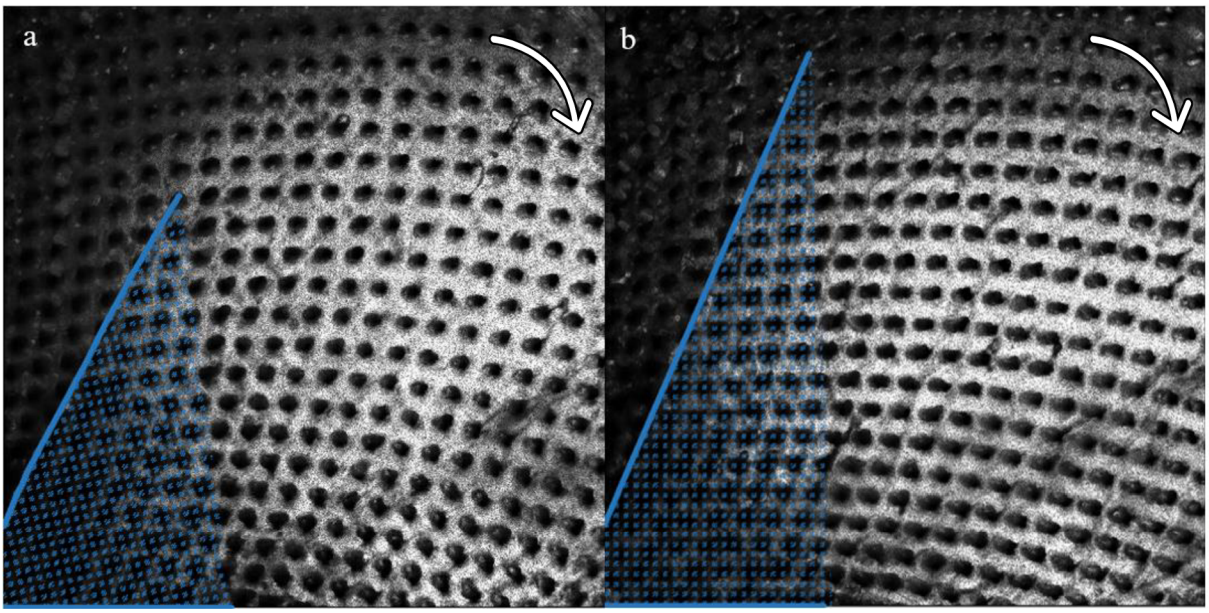
9 Vyhodnocení experimentálních dat

Základní testy s packingem II. iterace potvrdily, že skrz plexisklo je proudění dobře viditelné. Avšak z důvodu menší *h* packingu III. iterace bylo vyšší riziko zanášení plexiskla kapalinou než u předešlé iterace. Při provozu určitá část kapaliny vždy po skle poteče, tomuto jevu se nelze vyhnout, ovšem je třeba jej minimalizovat. Velké množství kapaliny tekoucí po plexisklech by výrazně zhoršilo schopnost opticky pozorovat proudění mezi dráty.

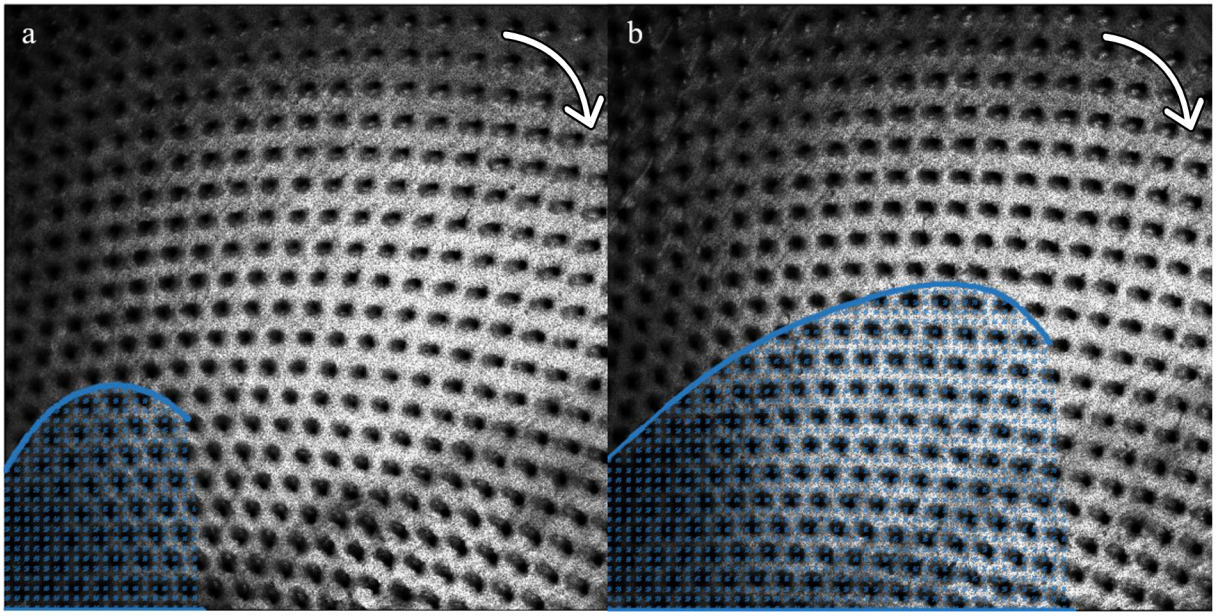
U vizualizace proudění napříč celým packingem bylo vyhodnocení provedeno mapováním oblasti, ve které se nachází významná část kapaliny, a byl proveden základní popis chování kapaliny. Analýza proudění na začátku výplně spočívala kromě mapování kapaliny také v určení průměrů kapiček, jejich absolutní rychlosti v packingu u_a a odvození empirického vzorce pro její výpočet.

9.1 Vizualizace proudění napříč celým packingem

Toto měření bylo první, při kterém byly pevně stanoveny provozní režimy, byť bez podložení jinými studiemi. Pro tuto vizualizaci byl použit makroskopický objektiv, který umožňoval pořídit záznam v celé šířce packingu. Hlavní pozornost byla věnována množství kapaliny, které poteče po plexisklech v různých provozních režimech.



Obrázek 26 Rozložení kapaliny při 400 ot/min; a) 7,8 m/s, b) 11,5 m/s



Obrázek 27 Rozložení kapaliny při 1 200 ot/min; a) 7,8 m/s, b) 11,5 m/s

Z vyznačených oblastí je patrné, že s vyššími n se mění úhel, pod kterým kapalina prolétá packingem. Dále lze pozorovat, že u režimů s vyššími u_0 dochází k větší penetraci packingu. Oba tyto závěry byly na základě rozvahy o chování kapaliny očekávané.

Po zhodnocení prvního měření bylo zjištěno, že záchyt kapaliny na plexisklech není značný, a nezhoršuje tak transparentnost packingu. Avšak proudění značně ovlivňuje vystřeďovací klec packingu. Při režimech s vyššími otáčkami strhávají sloupky klece kapalinu, která je sice sloupkem atomizována, nicméně je značně zpomalena a nemá dostatečnou kinetickou energii pro penetraci packingu. Kapalina pak vlivem gravitace klesá, dokud nespadne do, z axiálního pohledu, spodní části packingu, kterou je opět urychlena. Z toho plyne, že proudění kapaliny ve spodní části packingu bude výrazně odlišné od zbytku lože.

Na základě u_0, n, délky kontaktní plochy sloupku a kapaliny l_s = 5,88 mm a počtu sloupků klece p_s = 12 lze určit parametr R, tedy poměr mezi časem, kdy je kapalina v kolizi se sloupkem, a časem, kdy proudí do packingu. Po úpravě lze získat tento parametr následovně:

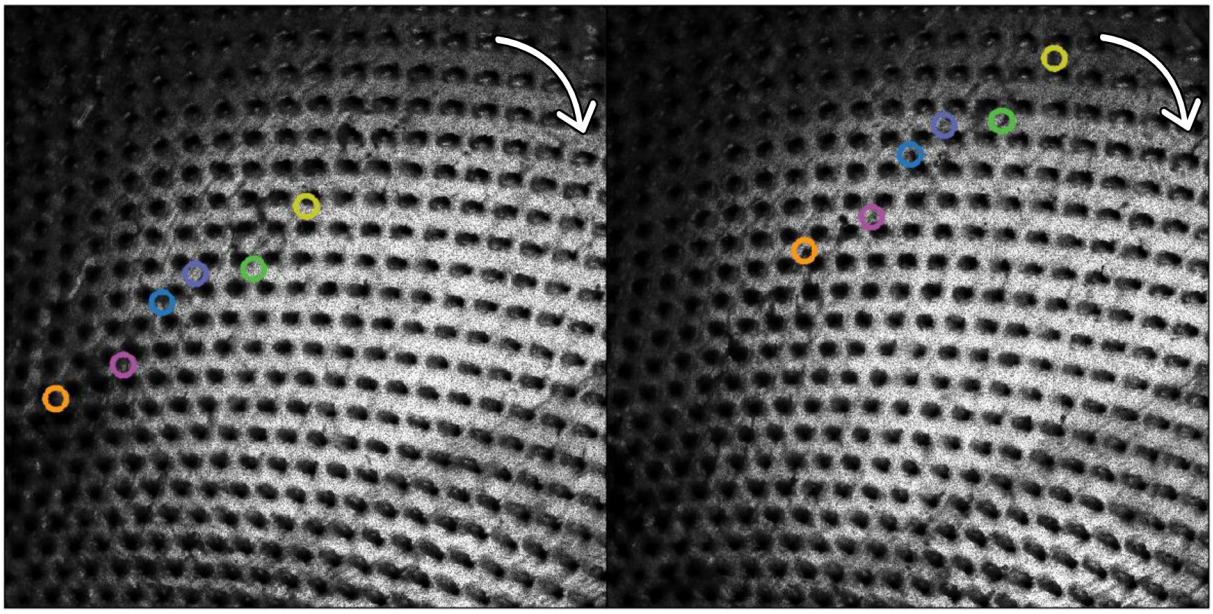
$$R = \frac{l_s \cdot p_s}{60} \cdot \frac{n}{u_0} [-] \tag{2}$$

Parametr R určuje, jak velká část kapaliny je ovlivněna sloupky vystřeďovací klece. Čím menší hodnota R, tím menší část kapaliny je rozražena klecí. Tento parametr nemůže být nikdy nulový, avšak může být větší než 1. Je-li R větší než 100 %, znamená to, že u_0 kapaliny je v porovnání s n tak nízká, že je kapalina sloupkem klece stržena dřív, než urazí celou l_s. S rostoucím R nad hodnotu 1 je kapalina výrazněji strhávána do vnitřní části packingu, odkud poté vlivem gravitace klesá do jiné části lóže. Na základě videozáznamů, bylo stanoveno, že parametr R by měl dosahovat maximálně 50 %. Při vyšší hodnotě je proudění kapaliny více ovlivněno interakcí s klecí než s packingem. Při měření s makroskopickým objektivem bylo dosaženo maximální hodnoty parametru R = 18 %, viz Tabulka 5, tedy 18 % z kapaliny letící do výplně packingu bylo strhnuto sloupky klece.

Tabulka 5 Parametr R vypočten pro provozní režimy s makroskopickým objektivem

		u_0 [m/s]	
		7,8	11,5
n [ot/min]	400	0,06	0,04
	800	0,12	0,08
	1200	0,18	0,12

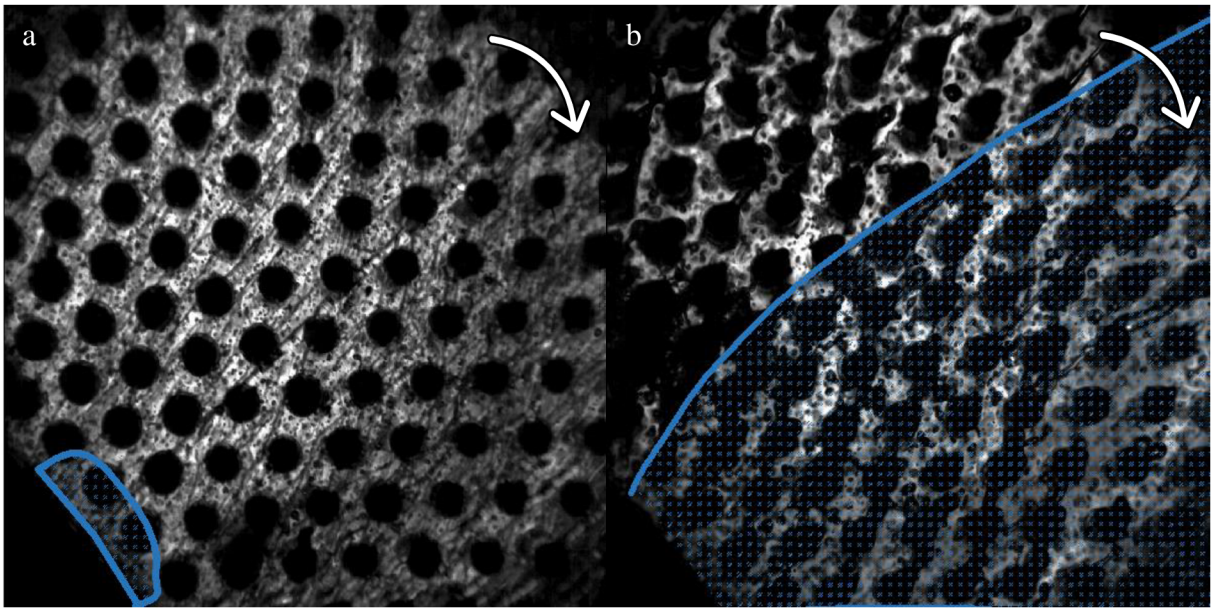
Při vyhodnocování byl pozorován ještě jeden jev: Značná část kapaliny pouze proletí packingem bez jakékoli interakce s jeho výplní. Obrázek 28 zobrazuje posun skupiny kapiček, které packingem pouze prochází bez srážek s dráty. K tomu docházelo u režimů s vyšší u_0 a n = 800 a n = 1200 ot/min. Tento jev není žádaný, jelikož kapky, které se srazí s dráty packingu, se roztříští na menší kapičky a zvětší mezifázové rozhraní, s jehož velikostí roste i efektivita absorpce. Tomuto jevu lze předejít použitím nesymetrické výplně nebo správnou volbou provozních parametrů n a u_0. Takové režimy mohou být přibližně stanoveny na základě rešerše studií s podobnými packingy nebo přesněji vizuální analýzou proudění v packingu v širokém spektru provozních parametrů. Stanovení ideálních provozních režimů druhým zmíněným způsobem by mohlo být prováděno s hrubším nastavením kamery, tedy nižší snímkovací frekvencí, což by zmenšilo objem ukládaných dat a současně dobu zápisu záznamů. Náročnost měření by se odvíjela od množství proměřovaných hodnot. Tímto způsobem lze přesně definovat ideální provozní režimy z hlediska vnitřního proudění pro konkrétní zařízení.



Obrázek 28 Posun neinteragujících kapiček s packingem po 1,5 ms

9.2 Analýza proudění na začátku výplně packingu

Po měření zaměřeném na zaznamenání celé šířky packingu bylo zhodnoceno proudění pomocí mikroskopického objektivu na začátku výplně packingu. Mimo analýzy proudění od vnitřního po vnější průměr packingu je pro správné pochopení chování kapaliny nutné analyzovat také interakci kapaliny s jednotlivými dráty. Měřicí oblastí byl začátek výplně packingu, kde dochází k prvnímu kontaktu proudu kapaliny a drátů. Podle studií, které publikovali Guo a kol., Kuang a kol. a Runlin a kol., by zde mělo docházet k nejvýraznější změně směru proudění kapaliny.



Obrázek 29 Oblast pokrytá kapalinou při a) 1,25 m/s a 1 800 ot/min; b) 5 m/s a 1 200 ot/min

Všechny provozní režimy jsou graficky vyhodnoceny v článku *„Liquid dispersion in inner cavity in rotating packed bed“*, který je doložen v příloze této práce. Ze záznamů je patrné, že při režimech s nízkou u_0 je směr proudění změněn téměř okamžitě. V režimech s vyššími n a malými u_0 měly sloupky vystřeďovací klece packingu natolik velký vliv na proud kapaliny, že kapalina se téměř nedostávala do packingu. Bylo to dáno vysokým parametrem R, který v těchto režimech přesahuje hodnotu 1, viz Tabulka 6. I u ostatních režimů kromě těch s nejnižšími n byl R poměrně vysoký, u 6 režimů přesáhl parametr R hranici 50 %. Při budoucí volbě provozních parametrů je nutné brát na R zřetel.

Tabulka 6 Parametr R vypočten pro provozní režimy při záznamu začátku výplně

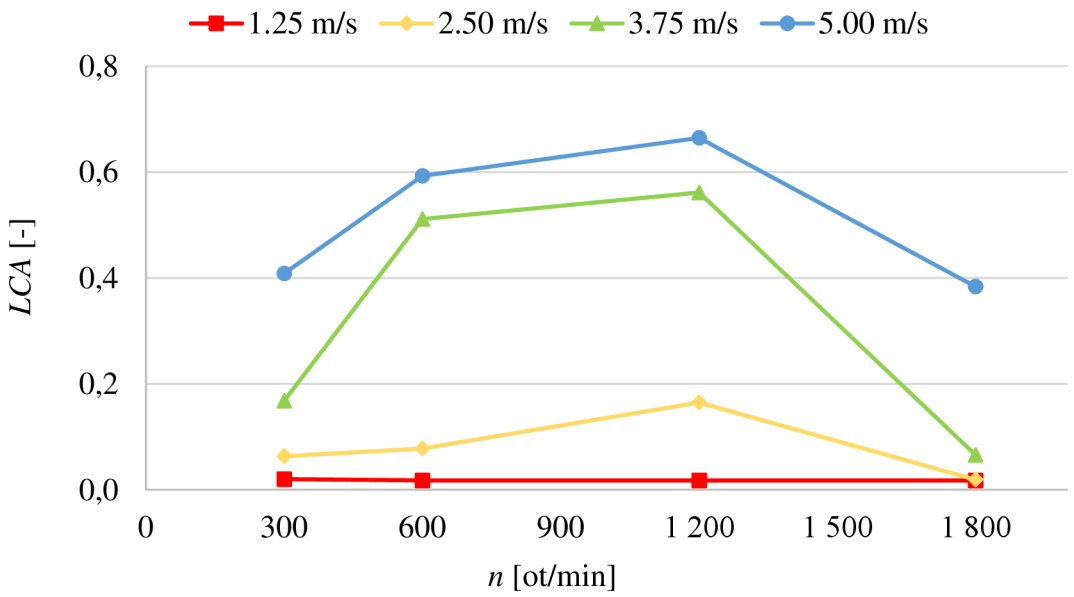
		u_0 [m/s]			
		1,25	*2,50*	*3,75*	*5,00*
	300	0,28	0,14	0,09	0,07
n	*600*	0,56	0,28	0,19	0,14
[ot/min]	*1 200*	1,13	0,56	0,38	0,28
	1 800	1,69	0,85	0,56	0,42

Při tomto měření nebyl pozorován tak výrazný jev prolétání kapek packingem jako u měření napříč celým packingem. Bylo to dáno volbou výrazně menších vstupních rychlostí. Nicméně tento jev se v některých režimech objevil, například při režimu s u_0 = 5 m/s a n = 600 ot/min.

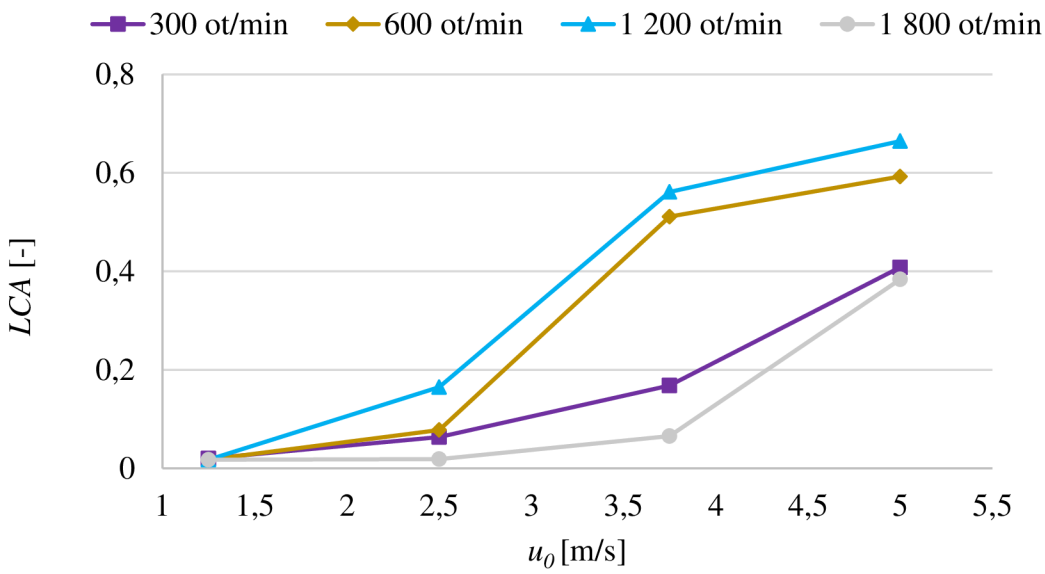
Provozní režimy byly kvalitativně hodnoceny na základě faktoru pokrytí plochy kapalinou *LCA* (z anglického *„Liquid coverage area“*). Tento faktor slouží pro porovnání schopnosti využití *a* packingu. Při nízkém *LCA* se kapalina dostává pouze do malé části packingu a není tak využit jeho celkový potenciál. *LCA* lze stanovit pomocí rovnice 3, kde *A* představuje plochu videozáznamu s pracovní kapalinou a A_0 představuje celkovou kamerou zaznamenávanou oblast. Hodnota *A* byla stanovena na základě grafického vyhodnocení proudění, viz Obrázek 29.

$$LCA = \frac{A}{A_0}\ [-] \tag{3}$$

Hodnoty *LCA* byly pro provozní režimy srovnány na základě otáček i rychlosti kapaliny. Nejlepší výsledky byly dosaženy při n = 1200 ot/min, viz Graf 2 a Graf 3. I režim s 600 ot/min měl v porovnání s režimem nejnižších a nejvyšších n dobrý výsledek. S rostoucí u_0 roste i hodnota *LCA*. Na grafech je také patrné, že při u_0 <2,5 m/s, bez ohledu na n, nedosahuje hodnota *LCA* ani 20 %. Při provozu by měla hodnota *LCA* dosahovat ideálně 100 %. K dosáhnutí této hodnoty v testovacím zařízení by bylo třeba použít distributor kapaliny s vyšším počtem výstupních trysek. Maximální dosažitelná hodnota *LCA* s použitým distributorem byla 66 %.



Graf 2 LCA v závislosti na provozních otáčkách



Graf 3 LCA v závislosti na rychlosti kapaliny na výstupu z trysek

Absorpce je přímo závislá na velikosti mezifázového rozhraní mezi absorbovanou látkou a absorbentem. Velikost mezifázového rozhraní odpovídá měrnému povrchu kapaliny v packingu, který je ovlivněn mimo jiné i *a* samotného lože. Se snižující se velikostí atomizovaných kapiček roste měrný povrch kapaliny a s ním i schopnost kapaliny absorbovat plyn. Z videozáznamů nebylo možné ručně analyzovat velikosti všech kapek v zaznamenávané oblasti, nicméně bylo možné stanovit velikostní třídy, ve kterých se většina kapek pohybuje. Tabulka 7 uvádí intervaly průměrů kapek v milimetrech pro každý provozní režim. Ve všech režimech se objevovaly malé kapky podobných rozměrů, ovšem průměry velkých kapek se v závislosti na provozních režimech výrazně lišily. Z hodnot je patrné, že se zvyšujícími *n* se velikost kapiček snižuje. Tento jev byl očekáván, vzhledem k tomu, že při vyšších *n* předávají dráty packingu kapalině větší kinetickou energii a kapalina tak intenzivněji atomizuje. Při konstantních *n* a zvyšující se u_0 se průměr kapiček také ve většině případů zvětšoval.

Tabulka 7 Průměr kapek v milimetrech na začátku výplně packingu

		u_0 [m/s]			
		1,25	*2,50*	*3,75*	*5,00*
n [ot/min]	*300*	0,2-1,36	0,28-1,59	0,25-1,74	0,19-1,5
	600	0,24-0,43	0,22-0,5	0,28-1,24	0,3-1,3
	1 200	0,18-0,33	0,18-0,52	0,17-0,8	0,13-0,9
	1 800	0,17-0,38	0,12-0,29	0,15-0,33	0,15-0,4

Při porovnání naměřených velikostí kapiček s velikostmi uvedenými ve studii Liu a kol., která se také zabývala vizualizací kapaliny uvnitř z části drátěného packingu, jsou hodnoty srovnatelné. V jejich studii ovšem není uvedena u_0, pouze m = 35 kg/h. Studie uvádí, že průměr kapek v části drátěné výplně packingu při n = 400 ot/min je 0,7 mm a s rostoucími *n* postupně klesá až na 0,3 mm při 1 200 ot/min.

Kromě velikosti kapiček má na kvalitu absorpce vliv také doba, po kterou je absorbent v kontaktu s absorbovanou látkou. Tuto dobu nejvíce ovlivňuje rychlost kapek v packingu. Při druhém měření tedy byly vyhodnoceny i absolutní rychlosti kapek u_a. Vyhodnocení bylo provedeno metodu PTV (z anglického *„Particle tracking velocimetry“*). Tato metoda měření rychlosti částic spočívá v měření vzdálenosti, kterou kapka urazí na dvou nebo více po sobě jdoucích snímcích. Na základě této vzdálenosti a známé snímkovací frekvence kamery je pak dopočtena rychlost částice.

Metodou PTV byly vyhodnoceny u_a 10 kapek pro každý provozní režim, které následně byly zprůměrovány. Při srovnání kapek prolétajících packingem bez interakce s výplní a kapaliny interagující s výplní jsou hodnoty jejich rychlostí srovnatelné. Průměrné u_a uvádí Tabulka 8. V tabulce je pro porovnání uvedena také obvodová rychlost packingu v_m na středním poloměru snímku d_m. Středním poloměrem je myšlena vzdálenost od středu výplně packingu po střed A_0. Díky malým rozměrům A_0 lze toto zjednodušení zavést bez rizika výrazné chyby.

Tabulka 8 Průměrná u_a na prvních řadách drátů v packingu

n [ot/min]	v_m [m/s]	u_0 [m/s] 1,25	2,50	3,75	5,00
300	*2,7*	2,4	2,7	2,8	3,8
600	*5,5*	5,0	5,0	5,2	5,5
1 200	*10,9*	9,8	10,4	11,4	11,5
1 800	*16,3*	14,3	14,7	16,2	16,3

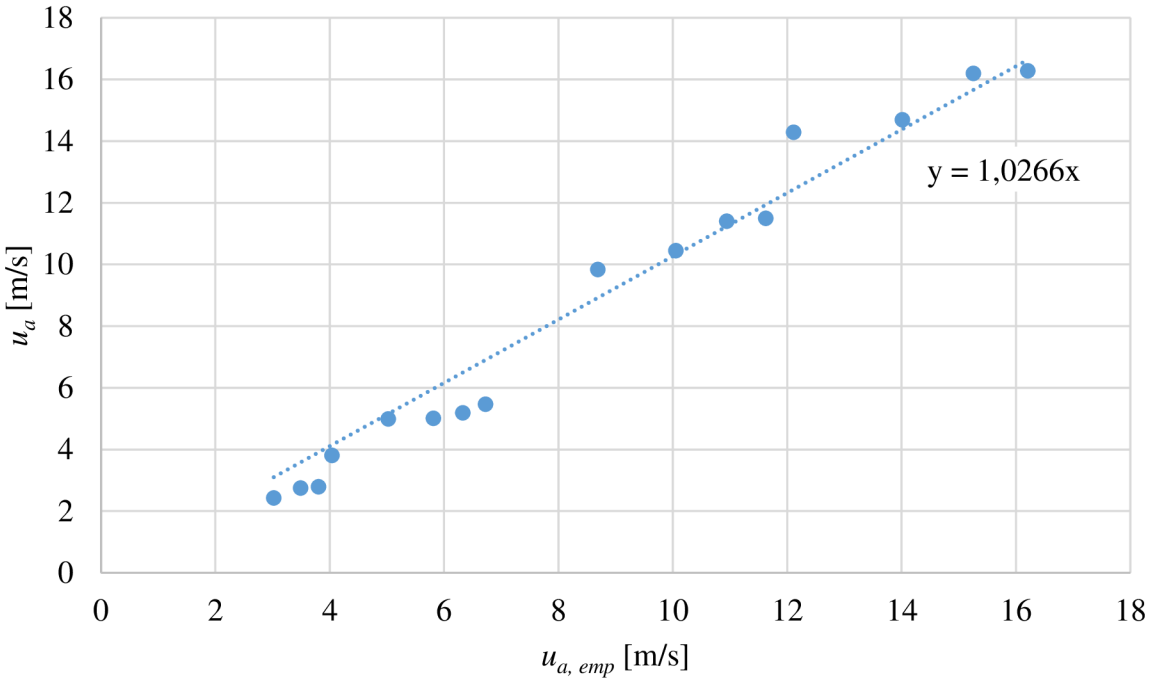
Z tabulky je patrné, že na u_a mají n větší vliv než u_0. Při nízkých n kapalina spíše naráží na výplň a zpomaluje, zatímco u vyšších n předává výplň kapalině kinetickou energii, a zvyšuje tak její u_a. To nicméně potvrzuje i srovnání s v_m. Navíc všechny uvedené hodnoty u_a spadají svojí velikostí do intervalu mezi nejmenší a největší obvodové rychlosti, kterých packing dosahuje v zaznamenávané oblasti.

Při porovnání u_a s výsledky studie Liu a kol., dosahují naměřené u_a nižších hodnot, než jsou uvedené ve studii. Hodnoty absolutní rychlosti uvedené ve studii lineárně rostou od 5,5 m/s při 400 ot/min až po 15 m/s při 1 200 ot/min. Avšak tyto rychlosti jsou měřeny v oblasti packingu o průměru od 197 do 325 mm, tedy v oblastech s vyššími v_m a proto dosahují vyšších hodnot.

Z průměrných u_a byla odvozena empirická korelace pro výpočet její hodnoty na základě v_m a u_0, viz rovnice 4. Při provozu zařízení jsou právě u_0 (respektive m) a n hlavními provozními parametry. Pro širší aplikaci této korelace byla místo n použita v_m, jelikož krom samotných n uvažuje také d_m packingu. Díky tomu lze přesněji porovnat packingy různých rozměrů. Nutno připomenout, že tento vzorec je odvozen na základě rychlosti kapaliny na kamerou zaznamenávané oblasti, tedy na průměru od 150 mm po cca 200 mm. Hodnoty u_a v jiných částech packingu mohou být odlišné, nicméně podle studií Guo a kol., Kuang a kol. a Runlin a kol. by se neměly lišit výrazně.

$$u_{a,emp} = 0{,}57 \cdot u_0^{0{,}21} \cdot (1 + v_m^{0{,}87}) \tag{4}$$

Při srovnání u_a a $u_{a,emp}$, viz Graf 4 je patrné, že korelace dobře popisuje reálné chování kapaliny. Koeficient korelace R^2, který popisuje kvalitu regresního modelu, dosahuje vysoké hodnoty 0,98. Největší odchylka vypočtené a měřené hodnoty byla 27 % z měřené hodnoty. Chyba více jak 20 % nastala u dvou hodnot z celkových 16 a u poloviny hodnot byla chyba menší než 5 % z měřené hodnoty.



Graf 4 Regresní analýza absolutní rychlosti kapaliny na začátku výplně packingu

9.3 Limitace transparentního packingu

Na základě vyhodnocení experimentálních dat lze konstatovat, že packing je možné použít pro optické experimenty. Ve finálním packingu lze spolehlivě pozorovat chování kapaliny i analyzovat její rychlost, tvar a trajektorii. Nicméně i současná konstrukce má svoje limitace.

Použití endocentrických objektivů s sebou neslo určité zkreslení obrazu, ovšem pro účely této práce byly dostatečné. Charakter proudění, rychlost i velikost kapek lze těmito objektivy analyzovat. Avšak pro přesnou analýzu by bylo nutné použití telecentrického objektivu.

Při provozních režimech s vyšší m bylo pozorováno, že část kapaliny ulpívá na plexisklech, a i mezi nimi, tedy mezi nosnými plexiskly a plexiskly s dírami. Tato kapalina se dala lehce rozlišit od kapaliny prolétající packingem, jelikož měla čistě radiální směr proudění a při kontaktu s drátkem se o něj netříštila ale pouze jej obtékala. Nicméně při automatickém vyhodnocování těchto dat pomocí algoritmů, může kapalina tekoucí po plexisklech vnášet do analýzy chybu. Tento jev by bylo možné redukovat zvýšením h. Pro snížení množství kapaliny mezi plexiskly by postačilo zatěsnit plexiskla v oblasti vystřeďovací klece (např. silikonem).

S vystřeďovací klecí se pojí asi nejvýraznější limitace, tedy strhávání značné části kapaliny při provozu ve vyšších n nebo s nižší u_0. Klec by bylo možné nahradit konstrukcí

na vnějším poloměru výplně, která by nahrazovala její funkci, a přitom nebránila vstupu kapaliny do výplně packingu. Toto řešení by bylo konstrukčně výrazně složitější. Současně je stávající řešení kompatibilní s testovacím zařízením na univerzitě v Lodži, kde je možné přímo zhodnotit kvalitu absorpce finální podoby packingu. Také proto bylo rozhodnuto, že v dalším výzkumu bude pozornost zaměřena mimo jiné na interakci kapaliny a klece. K tomu bude použito vysokorychlostní kamery a transparentní vystřeďovací klece. Ta se bude skládat z průhledných prstenců a neprůhledných nosných sloupků. Díky tomu bude možné zhodnotit rozpad kapaliny na sloupcích a posoudit jeho vliv na provoz packingu. Navzdory tomu, že se vliv klece zdá jako negativní, je možné že po bližší analýze interakce klece a kapaliny budou popsány i jevy kladně ovlivňující proudění v packingu.

Všechny experimenty byly doposud provedeny bez protiproudého zavedení pracovního plynu. Na základě provedených testů lze odhadnout charakter proudění, který nastane i při proudění s plynem. Pro experimenty s plynem je nutné provést ještě další úpravy a inovace testovacího zařízení. Těmi je myšleno např. úprava okruhu s pracovní kapalinou (nahrazení přívodu kapaliny z vodovodního řadu a ručního regulačního ventilu čerpadlem s frekvenčním měničem), sestavní celého plynového okruhu a výroba konstrukčního prvku pro odvod plynu a současně přívod pracovní kapaliny v ose rotace packingu. Proudění kapaliny bude ovlivněno v závislosti na množství dodávaného plynu, k jehož stanovení je nutná další rešerše. Této oblasti je v plánu se dále věnovat v rámci česko-polského projektu.

10 Závěr

Absorpce plynu kapalinou je jedním z nejvýznamnějších chemických procesů a lze se s ní setkat v širokém spektru aplikací od výroby sycených nápojů po čištění spalin. Ve velkých průmyslových aplikacích se nejčastěji jako absorbéry používají statické kolony. Těmito kolonami s různým vnitřním uspořádáním kapalina stéká proti proudu absorbovaného plynu. Jelikož je kapalina urychlována pouze díky gravitaci, dosahuje výška statických kolon desítek metrů. S rostoucím zastavěným prostorem rostou i investiční náklady, a proto je snaha budovat zařízení řádově menších rozměrů. Při zmenšení rozměrů a zároveň zachování schopnosti absorpce při velkých průtocích médií je nutné zvýšit efektivitu absorbéru. Rotační absorbér díky urychlování pracovní kapaliny odstředivou silou má výrazně kompaktnější rozměry oproti statickým kolonám. Pro zajištění vysoké efektivity absorpce je nutné porozumět dějům uvnitř rotujícího lože absorbéru. Jedním z hlavních dějů je samotné proudění pracovní kapaliny a její interakce s packingem.

V rámci této práce byl navržen, sestaven a otestován transparentní packing určený pro optické experimenty se zaměřením na vnitřní proudění uvnitř lože. Návrh packingu probíhal ve třech iteracích. Při první byly voleny materiály a způsob upínání výplně k nosným částem packingu. Jako materiál nosných částí bylo zvoleno plexisklo díky jeho dobré transparentnosti a houževnatosti. Jako výplň byly zvoleny nerezové tyče o průměru 1 mm díky jejich chemické odolnosti a dostupnosti. Po testování lepení a vtavení drátků do plexiskla bylo rozhodnuto, že drátky budou pouze vloženy do laserem vypálených děr a z obou stran zajištěny nosnými plexiskly. Druhá iterace spočívala v sestavení packingu a ověření samotného konceptu transparentního packingu. Při třetí iteraci byl sestaven finální packing, který se od packingu předešlé iterace lišil v drobné úpravě rozměrů a systémem stažení výplně. Finální konstrukce packingu o vnitřním průměru výplně 150,4 mm, vnějším 295,6 mm a axiální výškou 20 mm dosahovala měrného povrchu 185,53 m^2/m^3. Dále jsou v práci také popsány úpravy provedené na zařízení určeném k testování packingů týkající se krytu a distributoru kapaliny. Na upraveném testovacím zařízení bylo provedeno ověření funkčnosti i následné experimenty s vysokorychlostní kamerou. V rámci experimentů byla jako pracovní kapalina použita voda, jelikož není oproti běžně používaným absorbentům toxická. Proudění bylo nejprve mapováno napříč celým packingem s použitím makroskopického objektivu a následně analyzováno pouze na prvních řadách drátů s použitím mikroskopického objektivu. Zatímco mapování kapaliny s makroskopickým objektivem bylo zaměřeno na rozprostření kapaliny v packingu, analýza proudění na prvních řadách výplně byla kromě rozprostření kapaliny zaměřena také na určení velikosti a rychlosti kapek.

Při mapování proudění v režimech s vyššími provozními otáčkami n značná část kapaliny výplní pouze prolétala bez žádné interakce. Tento jev není žádaný, jelikož kapalina se netříští o dráty packingu, a nezvětšuje tak její měrný povrch, jehož velikost je důležitá pro proces absorpce. Při mapování proudění na začátku výplně packingu nebyl tento jev tak výrazný. Na záznamech z celé šíře packingu i ze začátku výplně je patrné, že při vyšších n vstupní proud výrazně ovlivňuje vystřeďovací klec. Záznamy pro analýzu proudění na začátku packingu ukazují, že při nejvyšších n = 1 200 a n = 1 800 ot/min a nejmenší výstupní rychlostí kapaliny z distributoru u_0 se kapalina nedostane ani za první řady drátů výplně. Tento jev lze eliminovat správným navržením provozních parametrů. Byl stanoven parametr R, který dává do poměru množství kapaliny, které je sloupkem strženo a množství kapaliny dodané do packingu.

Na základě chování kapaliny v packingu bylo stanoveno, že provozní režimy by měly být voleny tak, aby R nepřesáhlo 50 %. Dále bylo hodnoceno proudění na začátku výplně lože na základě parametru pokrytí plochy kapalinou *LCA*, který dává do poměru plochu zaznamenávané oblasti pokrytou kapalinou a celkovou plochu zaznamenávané oblasti. Při hodnocení provozních režimů tímto faktorem vyšel nejlépe režim s n = 1 200 ot/min a u_0 = 5 m/s. Nejmenší *LCA* bylo stanoveno u režimů s nízkými u_0. Ani režimy s nejvyššími n neměly vysoké *LCA*, bylo to z důvodu vlivu vystřeďovací klece zmíněného výše. Na základě videozáznamů byly vyhodnoceny průměry kapiček, které se pohybovaly v rozmezí od 0,12 po 1,74 mm v závislosti na provozním režimu. Dále byly metodou PTV, vyhodnoceny absolutní rychlosti kapek na začátku výplně packingu u_a. Bylo zjištěno, že velikost u_a je závislá na obou volených provozních parametrech, avšak mnohem výrazněji na n. Hodnota u_a byla vždy blízká hodnotě úhlové rychlosti na středním poloměru v zaznamenávané oblasti v_m. Průměry kapek i u_a odpovídaly hodnotám těchto parametrů ve studii Liu a kol. z roku 2020. Na základě naměřených hodnot u_a byla stanovena empirická korelace pro výpočet absolutní rychlosti na začátku výplně packingu $u_{a,emp}$.

Na základě vyhodnocených dat je lépe pochopeno chování kapaliny uvnitř rotačního strukturovaného packingu a byla také analyzována úskalí volby provozních parametrů pro sestavený transparentní packing. Současně bylo pozorováno několik jevů, které by bylo záhodno blíže analyzovat. Takovým jevem je například rozpad kapaliny na kleci packingu a jeho vliv na proudění v ostatních částech packingu. Průchod kapaliny packingem bez interakce, by byl také vhodný k bližšímu rozebrání a zhodnocení vlivu provozních režimů. Současně analýza proudění na výstupu z packingu může také přinést důležité poznatky ke kvalitě absorpce v zařízení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DOJČANSKÝ, J. a J. LONGAUER. *Chemické inžinierstvo II: difúzné procesy, prestup látky, absorpcia, adsorpcia, destilácia a rektifikácia...* Bratislava: Malé centrum, 1999. ISBN 80-967-0648-9.
2. TAN, L.S., A.M. SHARIFF, K.K. LAU a M.A. BUSTAM. Factors affecting CO_2 absorption efficiency in packed column: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2012, **18**(6), 1874-1883 [cit. 2023-05-12]. ISSN 1226086X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jiec.2012.05.013.
3. NEUŽIL, L. a V. MÍKA. *Chemické inženýrství I.* Vyd. 2., upr. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1998. ISBN 80-708-0312-6.
4. KING, Matthew J., William G. DAVENPORT a Michael S. MOATS. Production of H2SO4(ℓ) from SO3(g). In: *Sulfuric Acid Manufacture* [online]. Elsevier, 2013, 2013, s. 103-121 [cit. 2023-05-12]. ISBN 9780080982205. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-098220-5.00009-5
5. SVĚRÁK, T. a J. RICHTER. *Studijní materiály k Chemickému inženýrství.* Brno: Vysoké učení technické v Brně
6. OSTREZI, J. *Separace plynných polutantů na membránových kontaktorech.* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Svěrák CSc
7. WANG, G. Q., Z.C. XU a J.B. JI. Progress on Higee distillation—Introduction to a new device and its industrial applications. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2011, **89**(8), 1434-1442 [cit. 2023-05-12]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2011.02.013
8. RAO, D. P., A. BHOWAL a P. S. GOSWAMI. Process Intensification in Rotating Packed Beds (HIGEE): An Appraisal. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2004, **43**(4), 1150-1162 [cit. 2023-05-12]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie030630k
9. JASSIM, M. S., G. ROCHELLE, D. EIMER a C. RAMSHAW. Carbon Dioxide Absorption and Desorption in Aqueous Monoethanolamine Solutions in a Rotating Packed Bed. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2007, **46**(9), 2823-2833 [cit. 2023-05-12]. ISSN 0888-5885. Dostupné z:doi:10.1021/ie051104r
10. CHAMCHAN, N., J. CHANG, H. HSU, J. KANG, D. WONG, S. JANG a j. SHEN. Comparison of rotating packed bed and packed bed absorber in pilot plant and model simulation for CO 2 capture. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* [online]. 2017, **73**, 20-26 [cit. 2023-05-12]. ISSN 18761070. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtice.2016.08.046
11. NEUMANN, K., K. GLADYSZEWSKI, K. GROSS, H. QAMMAR, D. WENZEL, A. GÓRAK a M. SKIBOROWSKI. A guide on the industrial application of rotating packed beds. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2018, **134**, 443-462 [cit. 2023-05-12]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2018.04.024

12. LIU, H., Ch. LIN, S. WU a H. HSU. Characteristics of a Rotating Packed Bed. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 1996, **35**(10), 3590-3596 [cit. 2023-05-12]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie960183r
13. WANG, Zhihong, Tao YANG, Zhixi LIU, Shicheng WANG, Yang GAO a Mingou WU. Mass Transfer in a Rotating Packed Bed: A Critical Review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* [online]. 2019, **139**, 78-94 [cit. 2023-05-13]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2019.03.020
14. CHEN, Y., F. LIN, Ch. LIN, C. Y. TAI a H. LIU. Packing Characteristics for Mass Transfer in a Rotating Packed Bed. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2006, **45**(20), 6846-6853 [cit. 2023-05-12]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie060399l
15. ELSENHANS, A. *Apparatus for purifying gas*. US820772A. Uděleno 1906-05-15. Zapsáno 1906-01-10. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US820772A/en
16. SCHMIDT, P. G. *Gas-washer*. US1051016A. Uděleno 1913-01-21. Zapsáno 1911-02-25. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US1051016
17. PODBIELNIAK, W. J. *Centrifugal counter current contact apparatus*. 1930. US2004011A. Uděleno 1935-06-04. Zapsáno 1930-08-18. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US2004011A/en
18. PODBIELNIAK, W. J., W. G. PODBIELNIAK a C. M. DOYLE. *Centrifugal countercurrent exchange device*. US2758784A. Uděleno 1956-08-14. Zapsáno 1951-08-02. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US2758784A/en
19. PODBIELNIAK, W. J. *Centrifugal countercurrent contact apparatus*. US2670132A. Uděleno 1954-02-23. Zapsáno 1949-08-19. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US2670132
20. SELLA, A. Podbielniak's contactor. *Chemistry World* [online]. 2021-08-3 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: https://www.chemistryworld.com/podbielniaks-contactor
21. Thayer, G. *Centrifugal countercurrent contacting machine*. US2176982A. Uděleno 1939-10-24. Zapsáno 1937-08-06. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US2176982A/en
22. PLACEK, A. *Process and apparatus for treating liquids with a gaseous medium*. US2281616A. Uděleno 1942-05-05. Zapsáno 1937-03-01. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US2281616A/en
23. KAPITZA, P. L. *Rectification apparatus*. US2593763A. Uděleno 1952-04-22. Zapsáno 1946-02-20. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US2593763A/en
24. PILO, W. C. a S. W. DAHLBECK. *Apparatus for intimate contacting of two fluid media having different specific weight*. US2941872A. Uděleno 1960-06-21. Zapsáno 1959-06-09. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US2941872A/en
25. STANKIEWICZ, A a J. A. MOULIJN. Process Intensification: Transforming Chemical Engineering. *Chemical Engineering Progress* [online]. 2000, **96**(1), 22-

33 [cit. 2023-05-12]. Dostupné také z: https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/news/010022_cep_stankiewicz.pdf

26. RAMSHAW, C., R. H. a MALLINSON. *Mass transfer process*. US4283255A. Uděleno 1978-11-27. Zapsáno 1981-08-11. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US4283255A/en
27. WANG, G.Q., Z.C. XU a J.B. JI. Progress on Higee distillation—Introduction to a new device and its industrial applications. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2011, **89**(8), 1434-1442 [cit. 2023-05-12]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2011.02.013
28. CHEN, Y., F. LIN, Ch. LIN, C. Y. TAI a H. LIU. Packing Characteristics for Mass Transfer in a Rotating Packed Bed. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2006, **45**(20), 6846-6853 [cit. 2023-05-12]. ISSN 0888-5885. Dostupné z:doi:10.1021/ie060399l
29. LUO, Y., G. CHU, H. ZOU, Z. ZHAO, M. P. DUDUKOVIC a J. CHEN. Gas–Liquid Effective Interfacial Area in a Rotating Packed Bed. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2012, **51**(50), 16320-16325 [cit. 2023-05-12]. ISSN 0888-5885. Dostupné z:doi:10.1021/ie302531j
30. STEMMET, C. P. Gas-liquid solid foam reactors: hydrodynamics and mass transfer. *Technische Universiteit Eindhoven* [online]. 2008 [cit. 2023-05-12]. ISSN 978-90-386-1326-0. Dostupné z: doi:10.6100/ir635735
31. LÉVÊQUE, J., D. ROUZINEAU, M. PRÉVOST a M. MEYER. Hydrodynamic and mass transfer efficiency of ceramic foam packing applied to distillation. *Chemical Engineering Science* [online]. 2009, **64**(11), 2607-2616 [cit. 2023-05-12]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2009.02.010
32. RAJAN, S., M. KUMAR, M. Junaid ANSARI, D. P. RAO a N. KAISTHA. Limiting Gas Liquid Flows and Mass Transfer in a Novel Rotating Packed Bed (HiGee). *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2011, **50**(2), 986-997 [cit. 2023-05-12]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie100899r
33. ZHANG, W., B. ZHANG a Z. SHI. Study on hydrodynamic performance and mass transfer efficiency of nickel foam packing. *Procedia Engineering* [online]. 2011, **18**, 271-276 [cit. 2023-05-13]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2011.11.042
34. JAMAAT, S. S. a M. ABOLHASANI. Effect of blade packing structure and high-frequency ultrasound on micromixing efficiency enhancement in an RPB reactor. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2022, **188**, 197-208 [cit. 2023-05-12]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2022.09.048
35. LUO, Y., G. CHU, H. ZOU, F. WANG, Y. XIANG, L. SHAO a J. CHEN. Mass Transfer Studies in a Rotating Packed Bed with Novel Rotors: Chemisorption of CO 2. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2012, **51**(26), 9164-9172 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie300466f
36. CHANDRA, A., P. S. GOSWAMI a D. P. RAO. Characteristics of Flow in a Rotating Packed Bed (HIGEE) with Split Packing. *Industrial & Engineering*

Chemistry Research [online]. 2005, **44**(11), 4051-4060 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie048815u

37. REDDY, K. J., A. GUPTA, D. P. RAO a O. P. RAMA. Process Intensification in a HIGEE with Split Packing. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2006, **45**(12), 4270-4277 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie051382q
38. JI, J., Z. XU a Y. YU. *Equipment of multi-rotors zigzag high-gravity rotating beds*. US7344126B2. Uděleno 2008-03-18. Zapsáno 2005-04-12. Dostupné také z: https://patents.google.com/patent/US7344126B2/en
39. WANG, G.Q., Z.C. XU, Y.L. YU a J.B. JI. Performance of a rotating zigzag bed—A new HIGEE. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2008, **47**(12), 2131-2139 [cit. 2023-05-13]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2007.11.001
40. WOJTASIK-MALINOWSKA, J., M. JASKULSKI a M. JASKULSKI. CFD simulation of gas pressure drop in porous packing for rotating packed beds (RPB) CO2 absorbers. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2022, **29**(47), 71857-71870 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-022-20859-x
41. SUN, Y., Y. ZHANG, L. ZHANG, B. JIANG a Z. ZHAO. Structure Optimization of a Rotating Zigzag Bed via Computational Fluid Dynamics Simulation. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2014, **53**(35), 13764-13772 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie500961c
42. JIANG, B., Y. N. ZHANG, L. H. ZHANG a R. ZHANG. CFD Simulation of Gas Fluid Flow in a Rotating Zigzag Bed. *Advanced Materials Research* [online]. 2012, **457-458**, 948-952 [cit. 2023-05-13]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.948
43. ZHANG, B., Y.-M. LI a J.-B. JI. CFD Simulation of Gas Phase Flow Field in a Rotating Zigzag Bed. *The Chinese Journal of Process Engineering* [online]. 2017 **17**(1), 41-46, [cit. 2023-05-13]. ISSN 1009-606X. Dostupné z: doi:10.12034/j.issn.1009-606X.216243
44. WANG, G. Q., O. G. XU, Z. C. XU a J. B. JI. New HIGEE-Rotating Zigzag Bed and Its Mass Transfer Performance. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2008, **47**(22), 8840-8846 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie801020u
45. CORTES G., E. GERMAN, J. VAN DER SCHAAF a A. A. KISS. A review on process intensification in HiGee distillation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* [online]. 2017, **92**(6), 1136-1156 [cit. 2023-05-13]. ISSN 02682575. Dostupné z: doi:10.1002/jctb.5206
46. LI, Y., Y. LU, X.-J. LIU, G. WANG, Y. NIE aj. JI. Mass-transfer characteristics in a rotating zigzag bed as a Higee device. *Separation and Purification Technology* [online]. 2017, **186**, 156-165 [cit. 2023-05-13]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2017.05.049

47. LI, Y., Y. YULI, Z. XULI, X. LILI, X. LIU a J. JI. Rotating zigzag bed as trayed HIGEE and its power consumption. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* [online]. 2013, **8**(4), 494-506 [cit. 2023-05-13]. ISSN 19322135. Dostupné z: doi:10.1002/apj.1688
48. BURNS, J. R. a C. RAMSHAW. Process intensification: Visual study of liquid maldistribution in rotating packed beds. *Chemical Engineering Science* [online]. 1996, **51**(8), 1347-1352 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/0009-2509(95)00367-3
49. GUO, K., F. GUO, Y. FENG, J. CHEN, Ch. ZHENG a N. C. GARDNER. Synchronous visual and RTD study on liquid flow in rotating packed-bed contactor. *Chemical Engineering Science* [online]. 2000, **55**(9), 1699-1706 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/S0009-2509(99)00369-3
50. LIU, Y., W. WU, Y. LUO, G. CHU, H. ZOU, J. CHEN. Visual study of fluid flow in rotating packed bed reactors: a review. *CIESC Journal* [online] 2019, **70**(10): 3663-3676. Dostupné z doi:10.11949/0438-1157.20190614
51. SANG, L., Y. LUO, G.-W. CHU, Y.-Z. LIU, X.-Z. LIU a J.-F. CHEN. Modeling and experimental studies of mass transfer in the cavity zone of a rotating packed bed. *Chemical Engineering Science* [online]. 2017, **170**, 355-364 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2016.12.041
52. LU, Y.-Z., W. LIU, Y.-Ch. XU, Y. LUO, G.-W. CHU a J.-F. CHEN. Initial liquid dispersion and mass transfer performance in a rotating packed bed. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* [online]. 2019, **140**, 136-141 [cit. 2023-05-13]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2019.05.001
53. LIU, W., Y. LUO, Y.-Z. LIU a G.-W. CHU. Scale-Up of a Rotating Packed Bed Reactor with a Mesh-Pin Rotor: (I) Hydrodynamic Studies. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2020, **59**(11), 5114-5123 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/acs.iecr.9b06683
54. BIOFYZIKÁLNÍ ÚSTAV LF MU. *Elektrická impedanční tomografie*. 2013. Dostupné také z: https://www.med.muni.cz/biofyz/zobrazovacimetody/files/EIT.pdf
55. CHAOUKI, J., F. LARACHI a M. P. DUDUKOVIĆ. Preface. In: *Non-Invasive Monitoring of Multiphase Flows* [online]. Elsevier, 1997, 1997, xiii-xviii [cit. 2023-05-13]. ISBN 9780444825216. Dostupné z: doi:10.1016/B978-044482521-6/50000-0
56. TSCHENTSCHER, R., M. SCHUBERT, A. BIEBERLE, T.A. NIJHUIS, J. VAN DER SCHAAF, U. HAMPEL a J.C. SCHOUTEN. Tomography measurements of gas holdup in rotating foam reactors with Newtonian, non-Newtonian and foaming liquids. *Chemical Engineering Science* [online]. 2011, **66**(14), 3317-3327 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2011.01.051
57. YANG, Y., Y. XIANG, G. CHU, H. ZOU, Y. LUO, M. AROWO a J.-F. CHEN. A noninvasive X-ray technique for determination of liquid holdup in a rotating

packed bed. *Chemical Engineering Science* [online]. 2015, **138**, 244-255 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2015.07.044

58. YAN, Z.-V., Ch. LIN a Q. RUAN. Hydrodynamics in a Rotating Packed Bed. I. A Novel Experimental Method. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2012, **51**(31), 10472-10481 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie202257t
59. LLERENA-CHAVEZ, H. a F. LARACHI. Analysis of flow in rotating packed beds via CFD simulations—Dry pressure drop and gas flow maldistribution. *Chemical Engineering Science* [online]. 2009, **64**(9), 2113-2126 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2009.01.019
60. LIU, Y., Y. LUO, G.-W. CHU, J.-Z. LUO, M. AROWO a J.-F. CHEN. 3D numerical simulation of a rotating packed bed with structured stainless steel wire mesh packing. *Chemical Engineering Science* [online]. 2017, **170**, 365-377 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2017.01.033
61. SHI, X., Y. XIANG, L.-X. WEN a J.-F. CHEN. CFD analysis of liquid phase flow in a rotating packed bed reactor. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2013, **228**, 1040-1049 [cit. 2023-05-13]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2013.05.081
62. XIE, P., X. LU, X. YANG, D. INGHAM, L. MA a M. POURKASHANIAN. Characteristics of liquid flow in a rotating packed bed for CO2 capture: A CFD analysis. *Chemical Engineering Science* [online]. 2017, **172**, 216-229 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2017.06.040
63. ZHANG, W., P. XIE, Y. LI, L. TENG a J. ZHU. 3D CFD simulation of the liquid flow in a rotating packed bed with structured wire mesh packing. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2022, **427** [cit. 2023-05-13]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2021.130874
64. *LDA and PDA Reference Manual*. Dantec Dynamics, 1st edition, 2011
65. YEH, Y. a H. Z. CUMMINS. Localized Fluid Flow Measurements With An He–Ne Laser Spectrometer. *Applied Physics Letters* [online]. 1964, **4**(10), 176-178 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.1753925
66. DURST, F., G. BRENN a T. H. XU. A review of the development and characteristics of planar phase-Doppler anemometry. *Measurement Science and Technology* [online]. 1997, **8**(11), 1203-1221 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/8/11/002
67. ADRIAN, R. J. Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* [online]. 2005, **39**(2), 159-169 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-005-0991-7
68. CASCARANO, R. N. *Use of Fluorescein Dye for Characterizing Water and Solute Flux Across the Gr oss the Groundwater – Sur oundwater – Surface Water Inter ater Interface* [online]. Western Michigan University, 2018 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://scholarworks.wmich.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4731&context=masters_theses

69. Objektivy pro strojové vidění. *Analýza obrazu* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.analyza-obrazu.cz/objektivy/

SEZNAM ZKRATEK

A	Plocha zaznamenávané oblasti s kapalinou	m^2
A_0	Celková plocha zaznamenávané oblasti	m^2
a	Měrný povrch výplně packingu	m^2/m^3
d_{in}	Vnitřní průměr výplně packingu	m
d_m	Střední průměr	m
d_r	Průměr laserového paprsku	m
d_{out}	Vnější průměr výplně packingu	m
d_x	Průměr měřicího objemu kolmo na optickou osu	m
d_z	Průměr měřicího objemu v optické ose	m
h	Axiální výška packingu	m
j	Jednotkový difuzní tok	$mol/m^2 \cdot s^1$
l_s	Délka kontaktní plochy sloupku a kapliny	m
m	Hmotnostní průtok pracovní kapaliny	kg/h
m_{max}	Maximální hmotnostní průtok pracovní kapaliny	kg/h
m_{min}	Minimální hmotnostní průtok pracovní kapaliny	kg/h
n	Otáčky packingu	ot/min
n_{lat}	Látkové množství	mol
n_{max}	Minimální otáčky packingu	ot/min
n_{min}	Maximální otáčky packingu	ot/min
p_s	Počet sloupků vystřeďovací klece	-
S	Jednotková plocha	m^2
t	Čas	s
u_0	Rychlost kapaliny na výstupu z trysky	m/s
u_a	Absolutní rychlost kapky uvnitř packingu	m/s
$u_{a,emp}$	Absolutní rychlost kapky uvnitř packingu stanovená empirickou korelací	m/s
v_{in}	Obvovdová rychlost na začátku výplně	m/s
v_m	Obvodová rychlost na středním průměru	m/s
v_{out}	Obvodová rychlost na konci výplně	m/s
θ	Úhel mezi dvěma laserovými paprsky	°
ω	Úhlová rychlost	rad/s

SEZNAM PŘÍLOH

Konferenční článek na EFM 2022

Reference:
HÁJEK, J., M. MALÝ, O. HÁJEK, O. CEJPEK, P. BOUCHAL a M. JÍCHA. Liquid dispersion in inner cavity of rotating packed bed. 2022.

Liquid dispersion in inner cavity of rotating packed bed

Jiří Hájek[1*], *Milan Malý*[1], *Ondřej Hájek*[1], *Ondřej Cejpek*[1], *Patrik Bouchal*[1], *and Miroslav Jícha*[1]

[1]Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Republic

Abstract. Majority of power producing, and industrial processes generate a significant amount of carbon dioxide (CO_2). To reduce their CO_2 emissions, CCS (carbon capture and storage) can be used. One of the ways for CO_2 capture is rotating packed bed (RPB), which operates on a similar principle as an absorption tower. However, in the RPB, mass transfer rate is driven by a centrifugal force, hence the RPB could be much smaller than the absorption tower, which relay on gravitational force. Also, the internal design of the RPB could affect efficiency of CO_2 capture. There are several types of packing design, such as raised mesh, Zigzag, metal foam, or wire mesh. This study is focused on testing and construction of a transparent wire mesh packing, which could be used for analyse of fluid behaviour inside the packing e.g., a flow character, a liquid hold up and a liquid-gas interfacial. The operating packing speeds in the experimental part were 300 rpm, 600 rpm, 1200 rpm and 1800 rpm. The operating liquid (water) was supplied by six plain orifice nozzles with 1.44 mm diameter. Water was supplied to the system in a range of liquid flow rates from 44 to 176 kg/h. This corresponds to the jet velocity of 1.25 – 5.00 m/s. The observed area was the entry of the water jet into the wire mesh, where the atomization is the most intense. For the measurement, a high-speed camera was used. It is evident from results that with the higher jet velocity, the penetrating distance is larger, and the atomization is more intense.

1 INTORDUCTION

Polish-American chemist Walter Podbialniak was one of the first scientists, who realized that it is possible to reduce a size of a big distillation column using the centrifugal force instead of gravitational force [1]. The patent for his rapidly spinning disk with spiral groove for more intensive distillation was filed in 1932 [1]. Another Podbialniak's patent [2], which was granted 8 years later, presented a device with a spirally coiled rectangular plate which form a rotor, seated in a cylindrical stator. This device made possible an industrial scale production of a penicillin in a World War II [1]. Another inventor, who used the centrifugal field for process intensification, was George Thayer. In 1939 he obtained a patent for a liquid extractor with concentric cylindrical shells [2]. Adolph Placek in 1942 obtained a patent [3] for a device with concentric cylindrical shells as well, however, unlike in Thayer's device, these cylinders were perforated, and the liquid flowed in a radial direction, counter-currently to the flow of the gas. Placek was the first to use counter-current mass transfer in a high gravity (Higee) device. A first Zigzag Higee was patented in 1962 by Peter Kapitza [4] and consisted of two separated disks with fins. A Higee rotating packed bed (RPB) for two fluids was firstly proposed in patent granted in 1963 to Wilhelm Pilo and Wilhelm Dahlbeck [5]. Their device used a wire mesh construction as a rotor. However, first patent for the RPB with the wire mesh was granted to Peter Schmidt in 1913 [3], who proposed a device for cleaning and purifying of gases. This packing design is still used in a majority of modern RPB devices. A next major improvement in the Higee's was made in 2004, when Ji et al. [2] proposed Zigzag packing that consisted of two separate disks with fins, where only the lower disk rotates.

Moreover, the Higee device could had more than one rotor. As it was already mentioned, Kapitza's patent consisted of two zigzag packings and in 1969 Todd David proposed a multi-rotor Higee based on the Podbielniak's design of the vapor-liquid contactor from 1966 [7].

Modern RPB devices operate in centrifugal force fields of more than 1,000 times the gravitational force field [8]. An operating speed of the packing is for these devices in the range of 500–2,000 rpm and surface areas are about 750–5,000 m^2/m^3, which is 5–10 times higher compared to conventional column packings [8,9]. This implies that RPB can have 5–10 times higher mass transfer rate. Additionally, because of the formation of a thin liquid film in the high gravity centrifugal fields, a liquid-side mass-transfer coefficient could be 2–8 times higher than in conventional static columns [9]. On the other hand, the RPB devices have higher pressure drop and due to rotating parts, bearings and dynamic seals are more prone to disorders compared to the conventional columns.

To improve the mass transfer processes in the RPB, it is necessary to analyse the liquid flow inside of the packing. In 1996 John Burns et al. [10] constructed a rotating packed reactor with upper support disk made of plexiglass and made photos of the liquid flow inside of the packing. Kia Guo et al. [11] in 2000

* Corresponding author: Jiri.Hajek2@vutbr.cz

obtained continuous and stable images of droplets in a foam packing by installing small camera on the RPB's rotor. Yang Kuang et al. in 2011 [12] used a high-speed camera for an optical analysis of the cavity zone in rotating packed bed. In 2015 Yucheng Yang et al. [13] employed for the first time a non-invasive X-ray technique for analysing of inner hydrodynamics of the packing. Xue-Ying Gao et al. [14] made another inner flow characteristic's research by using particle image velocimetry measurement in 2017.

A construction of a fully transparent packing is unique, as only one paper was found. In 2020 W. Liu et al. [15] constructed a transparent rotating packed bed reactor with a mesh-pin rotor.

This study is focused on the construction and test of the packing from wires and plexiglass plates, which is fully transparent and usable for the optical measurements.

2 Experimental setup

The following section describes the experimental equipment used for measuring of the flow characteristics inside the wire mesh packing. Finally, the operating parameters are stated.

2.1 Rotating packed bed

The main structure of the packing, shown in Fig. 1, consists of two plexiglass disks with an outer diameter being 300 mm and an inner diameter being 146 mm. The lower disk is 3 mm thick and the upper one is 2 mm thick. Holes for wires are laser-drilled to these disks with a diameter of 1 mm. These holes are located at 34 pitch-circles, with spacing of 2.2 mm, each circle consists of 192 holes. Stainless-steel (AISI 304) rods, with a diameter of 1 mm and length of 24.5 mm, are inserted into these holes, which form wire mesh with height of 20 mm.

This whole structure is compressed by two plexiglass disks with thickness of 3 mm and 360 mm in diameter. In the centre of the lower support disk is one hole 46 mm in diameter for mounting the flange to transmit a torque from a shaft to the packing. The upper support disk has an inner diameter of 120 mm. A space between support disks is defined by eight distancing columns. A concentricity of the wire mesh and support disks is provided by a 3D printed cage with an inner and outer diameter of 136 and 146 mm that is fixed to the lower support disk. The whole packing is tightened by eight M5 screws which go through the distancing columns.

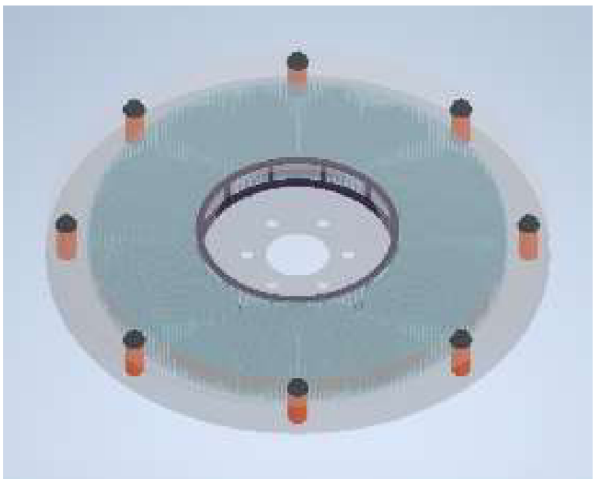


Fig. 1 Experimnetal wire mesh packing

The operating liquid was supplied to the packing by six plain orifice nozzles with outlet diameter of 1.44 mm. The nozzles are mounted on a 3D printed distribution divider.

Power from an electromotor to a shaft is transmitted through a trimming belt. The electromotor used in this experiment was a 50 Hz MOLL-MOTOR IE with power of 3 kW.

2.2 High speed imaging

High-speed camera FASTCAM SA-Z (Photron, Japan) was used for the optical measurements. Lens used for the measurement, was a long-distance microscope 12X Zoom lens (NAVITAR, New York, USA) which consist of 2X F-mount adapter (type 1-62922), a 12 mm F.F zoom lens (1-50486) and 0.25X lens (type 1-50011). A pulsed LED light HPLS-36DD18B (Lightspeed Technologies, USA) with the pulse duration of 400 ns was used as a light source. The camera resolution was 1024×1024 px, field of view was 2.54×2.54 cm, and frame rate was set to 20,000 fps.

2.3 Operating parameters

Coriolis mass flowmeter Krohne OPTIMASS 6400C S10 (Krohne, Germany) with accuracy of ± 0.1 % of measured value, was used for measurement of the mass flow rate. The mass flow rate was controlled by a valve behind the flow meter, as shown in Fig. 2.

The experiment was focused on the research of the effects of the jet impact velocity and the operating speed on the liquid flow and droplets formations inside the RPB. The variations of these parameters are shown in Table 1.

Table 1. Investigated variation of operating parameters

Jet velocity	v [m/s]	1.25	2.50	3.75	5.00
Flow mass rate	$\dot{m}$ [kg/h]	44	88	132	176
Operating speed of RPB	n [rpm]	300	600	1200	1800

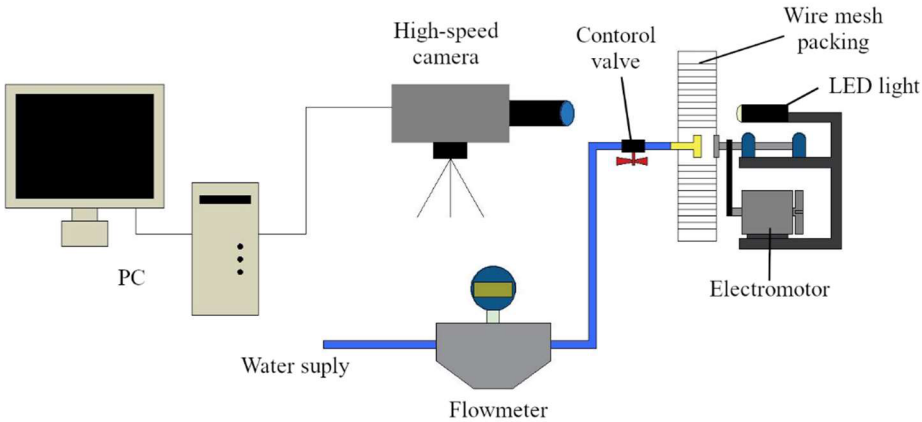


Fig. 2 Setup of the optical measurement of rotating packed bed

3 Results and discussion

In this section, recordings obtained by using the high-speed camera are presented. This section is divided to three subsections. Initially the raw visualisation of the liquid flow inside of the wire mesh is presented, afterwards an evaluation of the liquid flow based on established parameters take place, and finally, the liquid bridge formation between the wires in the packing is described.

3.1 Visualisation of liquid flow

On the camera footage, there were also some faulty droplets on plexiglasses, which were formed during the previous measurements, mainly in regimes with high operating speed. In Fig. 3 examples of faulty droplets are shown. However, these droplets were filtered out. In Figures 4 and 5 liquid coverage areas (LCA) in the wire mesh packing are illustrated.

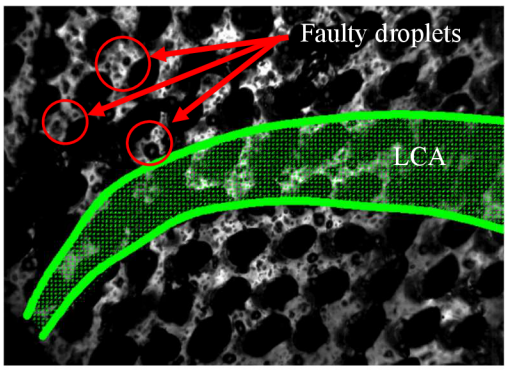


Fig. 3 Faulty droplets

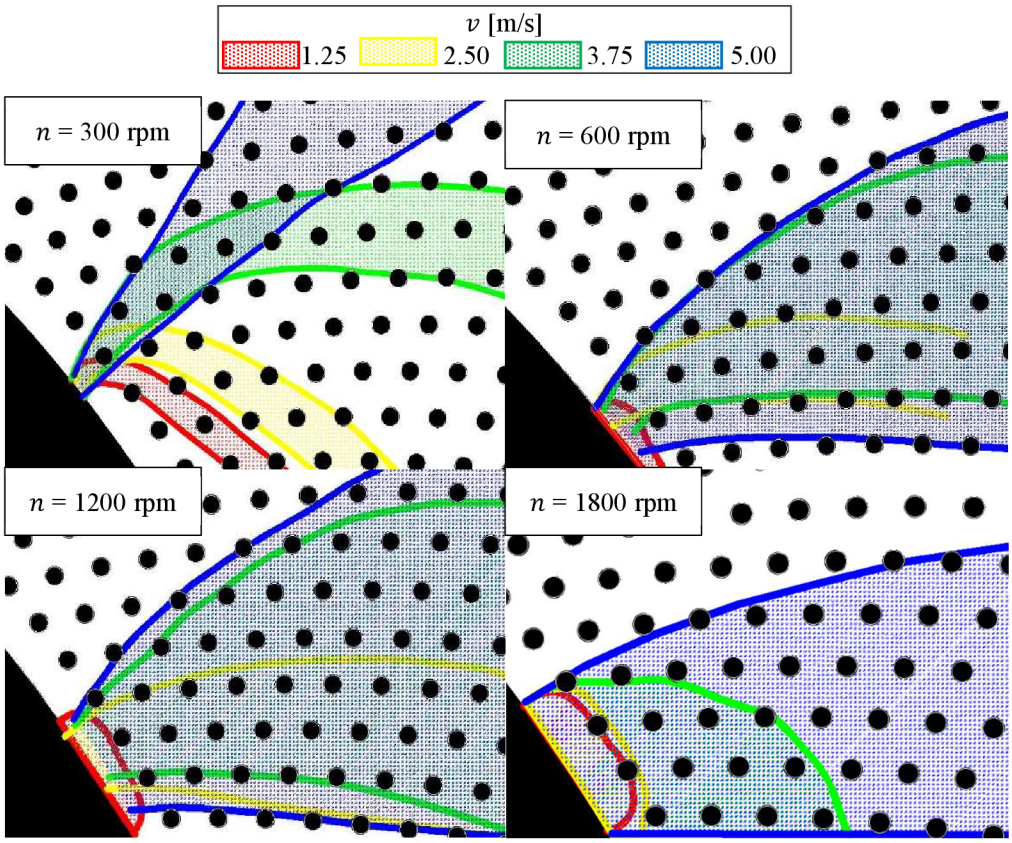


Fig. 4 Liquid coverage area depending on opperating speed

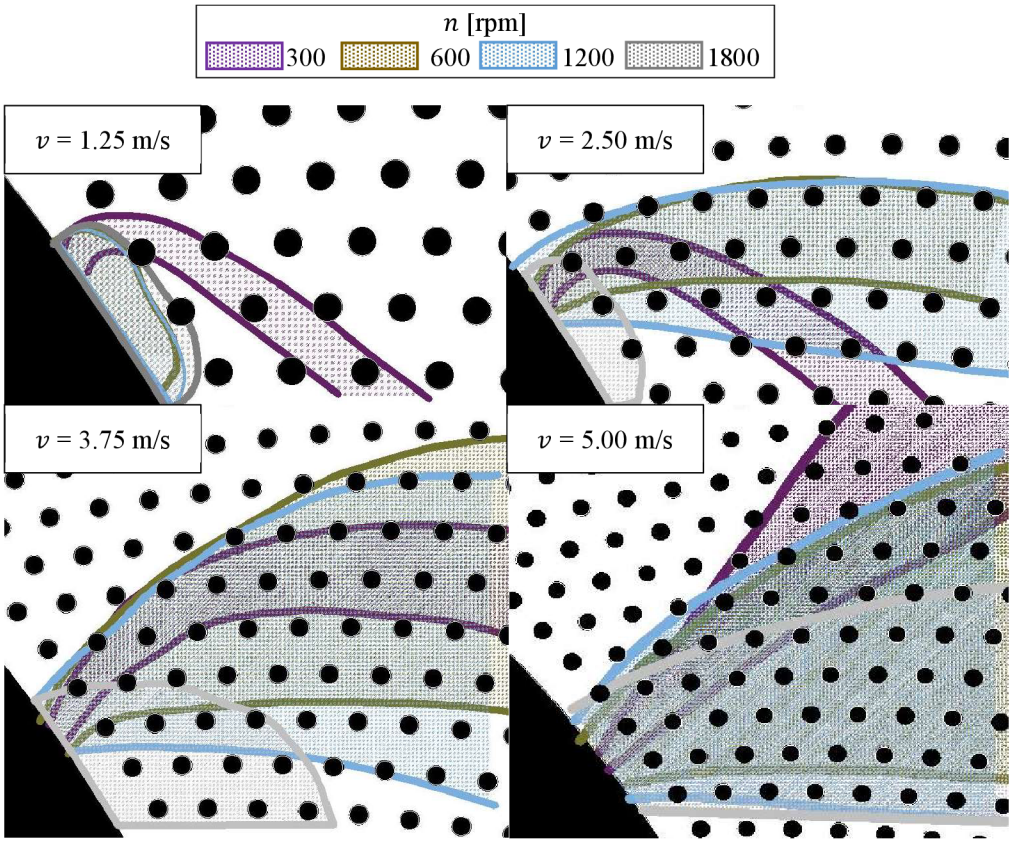


Fig. 5 Liquid coverage area depending on jet velocity

It is evident, that the LCA is for the low jet velocities and the high operating speed situated under the first line of wires. It is caused by jet collision with the 3D printed cage, which provides the concentricity of disks with wires. This cage has twelve 5 mm thick support columns, which in the high operating speed regimes collide with jet for significant amount of time. The cage impact on the size of LCA grew with increasing operating speed of RPB.

3.2 Evaluation of liquid flow

Based on visualisation introduced in the last subsection a parameter A describing liquid coverage area was established. Finally, the parameter A_0 is established, to represents the ideal LCA i.e., the jet direction is straight radial, and liquid is presented evenly in the whole area under the jet. These parameters relate only to camera's field of view, which captures 13 out of 34 pitch-circles. Quotient A/A_0 represents the filling ratio of the LCA.

The lowest filling ratio of the LCA occurs with the lowest jet velocity due to a small momentum of the liquid flow and due to the great impact of the concentricity cage as was mentioned before. Hence, with the higher jet velocity the liquid penetration is increased and so is the filling ratio of the LCA. On the other hand, with operating speed above 1200 rpm the quotient A/A_0 decreases. The best filling ratio of the LCA was achieved with the highest jet velocity (5 m/s) and operating speed of 1200 rpm. Based on the values in Figures 6 and 7 is apparent that the optimal packing speed for inner diameters of wire mesh packing is in the range of 600 to 1200 rpm.

In case of neglect of the two lowest velocities, that means 1.25 and 2.5 m/s, due to the great impact of 3D printed cage, a guidance of an optimal operating speed-

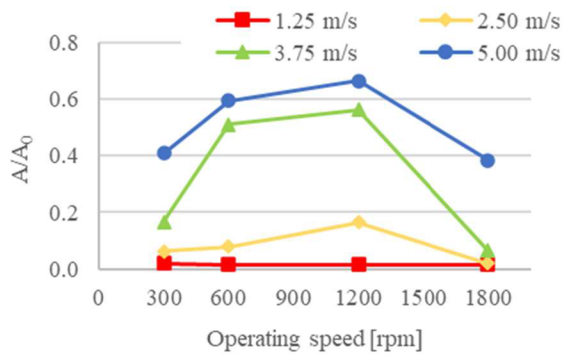


Fig. 6 Filling ratio of the LCA depending on the jet velocity

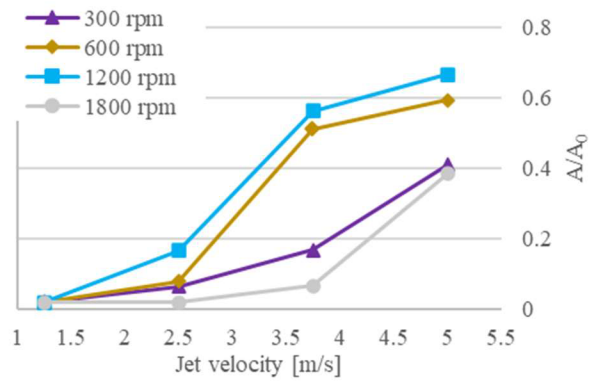


Fig. 7 Filling ratio of the LCA depending on the opperating speed

jet velocity ratio can be calculated by Eq. (1). This ratio is indicative because the calculations are based on only two jet velocities. Nevertheless, to establish an accurate value of the operating speed-jet velocity ratio, further study is needed.

$$\frac{n}{v} = 465.3 \tag{1}$$

3.3 Liquid bridge forming

Based on the high-speed camera footage, the bridge forming was analysed. The bridges made of the liquid are formed between wires in operating regimes with the higher jet velocity. The regime without liquid bridges and the regime with liquid bridges in the whole liquid coverage area are shown in Fig. 8.

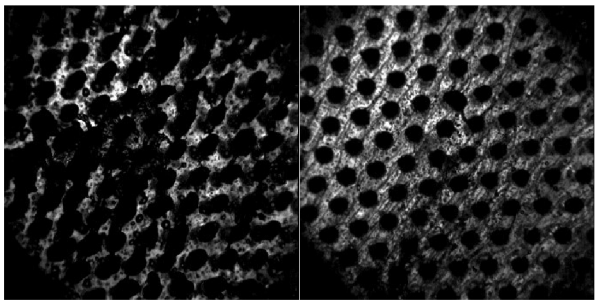


Fig. 8 Liquid bridges, left: No bridges, right: Bridges in whole LCA

In Fig. 9 regimes without liquid bridges, regime with liquid bridges on the front rows of wires and the regime with bridges in the whole LCA are illustrated.

		v [m/s]			
		1.25	2.50	3.75	5.00
n [rpm]	300				
	600				
	1200				
	1800				
		No bridges			
		Bridges on front wires			
		Bridges in whole LCA			

Fig. 9 Map of bridge forming inside inner part of wire mesh packing

4 Conclusion

In this study, a transparent wire mesh packing was constructed and tested. The plexiglass wire mesh packing was well transparent during the whole measurement. A 3D printed cage significantly influenced liquid coverage areas (LCA) in regimes with low jet velocities and high operating speeds. The filling ratio of the LCA increase with an increasing jet velocity. The optimal operating speed for achieving the high filling ratio of LCA was in the range from 600 to 1200 rpm. The approximate operating speed-jet velocity ratio, based on two highest jet velocities (3.75 and 5.00 m/s), was determined to be 463.5. Liquid bridges are formed mainly in operating regimes with a high jet velocity and high operating speed.

Acknowledgements

This work has been supported by the projects No. GA22-17806S and No. GA21-45227L funded by the Czech Science Foundation and project No. FSI-S-20-6295 founded by Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology.

References

1. A. Sella, Chemistry World, (2021).
2. D. P. Rao, Indian Chemical Engineer **57**, 282-299 (2015).
3. A. Placek, US2281616A, (1937).
4. P. L. Kapitza, US2593763A, (1952).
5. C. W. Pilo, S. W. Dahlbeck, US2941872A, (1960).
6. P. G. Schmidt, US1051016A, (1913).
7. D. B. Todd, US3486743A, (1969)
8. D. P. Rao, A. Bhowal, and P. S. Goswami, Industrial & Engineering Chemistry Research 43, 1150-1162 (2004).
9. A. Chandra, P. S. Goswami, and D. P. Rao, Industrial & Engineering Chemistry Research 44, 4051-4060 (2005).
10. J. R. Burns and C. Ramshaw, Chemical Engineering Science **51**, 1347-1352 (1996).
11. K. Guo, F. Guo, Y. Feng, J. Chen, C. Zheng, and N. C. Gardner, Chemical Engineering Science **55**, 1699-1706 (2000).
12. Y. Liu, W. Wu, Y. Luo, G. Chu, H. Zou, J. Chen, CIESC Journal **70**, 3663-3676 (2019).
13. Y. Yang, Y. Xiang, G. Chu, H. Zou, Y. Luo, M. Arowo, and J. -F. Chen, Chemical Engineering Science **138**, 244-255 (2015).
14. X. -Y. Gao, G. -W. Chu, Y. Ouyang, H. -K. Zou, Y. Luo, Y. Xiang, and J. -F. Chen, Industrial & Engineering Chemistry Research **56**, 14350-14361 (2017).
15. W. Liu, Y. Luo, Y. -Z. Liu, and G. -W. Chu, Industrial & Engineering Chemistry Research **59**, 5114-5123 (2020).