



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**KRITICKÉ TEPELNÉ TOKY NA HLADKÝCH A
UPRAVENÝCH POVRŠÍCH**

CRITICAL HEAT FLUX ON SMOOTH AND MODIFIED SURFACES

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ladislav Suk

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

BRNO 2020

KLÍČOVÁ SLOVA

Kritický tepelný tok, konvektivní var, mezikruží, Inconel™ 625, Zirkoniová slitina, dvoufázové proudění

KEYWORDS

Critical heat flux, flow boiling, annulus, Inconel™ 625, Zirconium alloy, two phase flow

MÍSTO ULOŽENÍ ORIGINÁLU DIZERTAČNÍ PRÁCE

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

OBSAH

ÚVOD.....	4
1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE:	4
2 DVOUFÁZOVÝ PŘESTUP TEPLA.....	5
3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	8
3.1 Testovací sekce	10
3.2 Zdroj stejnosměrného proudu	12
3.3 Instrumentace a přesnost měřidel.....	14
3.4 Metodika měření kritického tepelného toku	16
3.5 Smáčivost povrchu a statický kontaktní úhel.....	18
4 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ NA HLADKÉM POVRCHU	21
5 KRITICKÉ TEPELNÉ TOKY NA MODIFIKOVANÉM POVRCHU	24
5.1 Shrnutí výsledků KTT na modifikovaných površích.....	25
6. ZÁVĚR.....	27
7. BIBLIOGRAFIE	29
ŽIVOTOPIS AUTORA.....	30
ABSTRAKT	31
ABSTRACT	31

ÚVOD

Var kapalin je hojně využíván pro chlazení a tvorbu páry v mnoha technických aplikacích, kde je třeba přenášet co nejvyšší tepelné toky s minimálním rozdílem teplot. Intenzivní přestup tepla zajišťuje mechanismus fázové změny syté kapaliny ve styku s vytápěným povrchem. Tento děj je limitován kritickým tepelným tokem (KTT). KTT je maximální tepelný tok, jenž jsme schopni přenést pomocí bublinkového varu před přechodem k blánovému varu. Při přechodu k blánovému varu dochází k prudkému snížení koeficientu přestupu tepla, což v systémech s nezávislým řízením výkonu vede k rapidnímu zvýšení teploty povrchu, které může vést k nevratnému poškození zařízení.

Nedávné výzkumy prokázaly, že úprava povrchu porézní vrstvou, žebrováním, usazeninami z nanočástic¹, zdrsněním povrchu nebo mikro povlakováním může zvýšit KTT, čímž je umožněno dosažení vyšších využitelných tepelných toků s ohledem na bezpečnostní a ekonomická hlediska.

Předmětem zájmu této práce je hledání aplikovatelných povrchových úprav pokrytí jaderného paliva k zvýšení kritického tepelného toku při konvektivním varu. Tato data by mohla posloužit k dalším bezpečnostním analýzám kritického tepelného toku v jaderných reaktorech.

Hlavním cílem tohoto projektu byl návrh a realizace experimentálního zařízení, na kterém by bylo možné zkoumání konvektivního varu na modifikovaném pokrytí jaderného paliva a zejména zkoumání kritického tepelného toku, jako limitního parametru při návrhu aktivní zóny jaderného reaktoru.

Při uvádění zařízení do provozu byl použit místo zirkoniové slitiny Inconel pro svou vyšší tepelnou odolnost a jednodušší technologické zpracování. Po zvládnutí experimentálních postupů s Inconelem bylo přikročeno k experimentům na zirkoniové slitině.

1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE:

1. Analýza dosavadního poznání v tomto oboru s důrazem na experimentální práce a termohydraulické modely KTT.
2. Navržení a stavba nového termohydraulického stendu k experimentům s dvoufázovým prouděním s možností vizualizace.
3. Navržení a stavba nové vertikální mezi kruhové testovací sekce.
4. Identifikace výrobních procesů a výrobců pro výrobu modifikovaného povrchu trubek.
5. Experimentální prozkoumání chování kritických tepelných toků na technicky hladkých a modifikovaných trubkách.

¹ Mechanismus depozice zobrazen na Obr. 3.

2 DVOUFÁZOVÝ PŘESTUP TEPLA

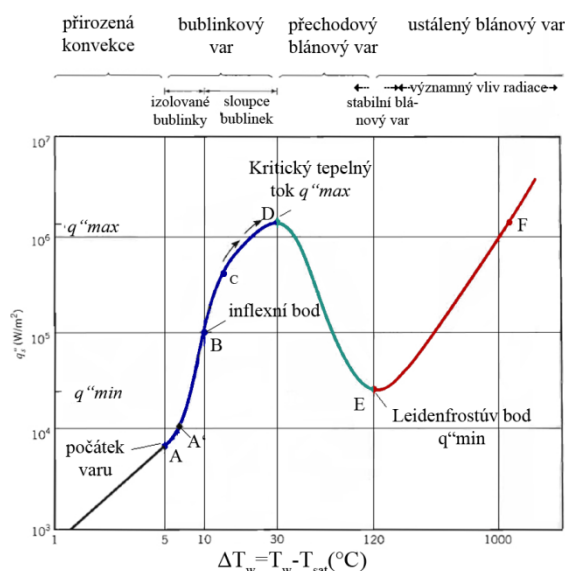
Základní rozdělení varu je na var ve velkém objemu a konvektivní var. Při varu ve velkém objemu je pohyb kapaliny zapříčiněn pouze přirozenou konvekcí.

Pro konvektivní var je charakteristický pohyb kapaliny přes vyhřívaný povrch vyvolaný nuceně vnější silou většinou čerpadlem. Typickým příkladem konvektivního varu je tepelný cyklus chladiva v chladniče.

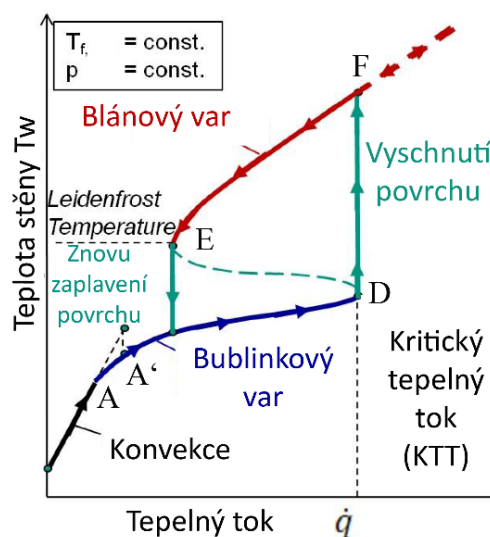
Proudění chladiva ve varném jaderném reaktoru BWR je aplikací konvektivního varu. Var na povrchu palivových tyčí je výhodný pro schopnost přenést velký tepelný tok s relativně malým rozdílem teplot. Tohoto jevu je dosaženo díky velkému latentnímu teplu chladiva a faktem, že změna fáze při stejném tlaku je izotermickým dějem. Bublinky rostou v malých nerovnostech vyhřívaného povrchu, až dosáhnou kritické velikosti a odtrhnou se do proudu kapaliny. Toto dynamické chování bublin vede k neustálému narušování tepelné mezní vrstvy a zlepšování přestupu tepla. Vliv na dvoufázový přenos tepla mají například tlak, hmotnostní tok, geometrie, povrch vytápěného kanálu, interakce mezi chladivem a povrchem.

První, kdo popsal charakteristickou křivku varu ve velkém objemu, byl Japonec Nukama [2] v roce 1934. Podle Newtonova vztahu (1), kde T_w je teplota stěny T_∞ je teplota kapaliny v celém objemu a α je koeficientem přestupu tepla, můžeme na základě znalosti $\dot{Q}$ a ΔT_w odhadnout chování koeficientu přestupu tepla při varu.

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_\infty) = \alpha\Delta T_w \quad (1)$$



Obr. 1 Křivka varu vody za atmosférického tlaku ve velkém objemu v systémech s řízenou teplotou stěny $\dot{q}(T_w)$ [3]



Obr. 2 Křivka varu ve velkém objemu v systémech s řízeným tepelným výkonem $T_w(\dot{q})$ [1]

Na Obr. 1 je popsána křivka varu v systémech s řízenou teplotou stěny, kde je tepelný tok čistě funkcí T_w . Teplota stěny je prakticky na tepelném toku nezávislá.

Příkladem takových to zařízení je parní topení nebo parogenerátor tlakovodních reaktorů.

Na Obr. 2 je znázorněna křivka varu v zařízeních, kde je tepelný tok na teplotě stěny prakticky nezávislý. Příkladem takových to zařízení je elektrické topení či jaderný reaktor. Tato křivka varu je definovaná zvyšujícím se tepelným výkonem a měřením teploty stěny. Během experimentů varu ve velkém objemu se udržuje teplota tekutiny a tlak konstantní. Při experimentech s konvektivním varem se jak teplota média, tak tlak mění, konstantními zůstávají pouze hmotnostní tok, teplota na vstupu a tlak na výstupu ze sekce.

Při varu ve velkém objemu, je-li hodnota tepelného toku $\dot{q}$ malá, nedochází k varu, a jedná se o přestup tepla v podmínkách jednofázového proudění. Teplota povrchu se poměrně rychle zvyšuje díky relativně malému koeficientu přestupu tepla.

V oblasti A-A' na Obr. 1 se začíná uplatňovat bublinkový var, intenzita varu je malá a přirozená konvekce zůstává hlavní příčinou cirkulace chladiva.

Bublinkový var se vyskytuje v rozmezí $\Delta T_{w,A} \leq \Delta T_w \leq \Delta T_{w,D}$. V tomto rozsahu se vyskytují dva odlišné režimy proudění. V oblasti A-B to jsou jednotlivé bublinky mísící kapalinu blízko vytápěného povrchu. Většina přenosu tepla je prostřednictvím přímého kontaktu kapaliny s vytápěným povrchem, a nikoliv přes parní bublinky stoupající z povrchu. Při zvyšování ΔT_w nad hodnotu $\Delta T_{w,B}$ se začíná zapojovat více nukleačních jader a zvýšená tvorba parních bublinek zapříčiňuje slučování parních objemů do sloupců bublin přecházejících do parních dutin. Bod C znázorňuje maximum koeficientu přestupu tepla α . V tomto bodě začíná klesat α se zvyšujícím se ΔT_w . Tento jev je zapříčiněn prudkým prouděním parních bublinek od vytápěného povrchu, které ztěžují přístup chladicí kapaliny. Koeficient α se dále snižuje s rostoucím ΔT_w až k bodu D, ve kterém rychlost parních bublinek dosahuje maxima, při kterém se chladivo stačí dostat zpětným proudem k povrchu. Jakékoliv další zvýšení teploty ΔT_w vede k tvorbě parní blány izolující povrch od chladiva, zde dochází ke krizi varu prvního druhu.

V zařízeních, kde vývin tepla je nezávislý na teplotě, vede pokrytí povrchu parní blánou k razantnímu snížení koeficientu přestupu tepla. Důsledkem je teplotní skok do oblasti blánového varu, viz Obr. 2. Dochází k vyschnutí povrchu a jeho obklopení přehřátou párou. V závislosti na podmínkách může teplota povrchu při blánovém varu překročit teplotu tavení vyhřívaného materiálu, což způsobí tepelné poškození vyhřívaného zařízení. Tento stav je často označován pojmem „burnout“ a je limitní provozní podmínkou, které se musí předcházet v zařízeních s nezávislým tepelným výkonem. Tudíž znalost KTT pro specifické podmínky zařízení je nedílnou součástí pro bezpečné užívání.

V režimu blánového varu začíná být dominantní mechanismus přenosu tepla zářením. Zvýšení tepelného toku v této oblasti je přímo úměrné T_w^4 , vzhledem k tomu, se konvektivní část α prakticky nemění.

Při snižování tepelného toku je křivka varu značně odlišná od křivky varu při zvyšování tepelného toku. Režim blánového varu se zachovává i při snížení tepelného toku pod KTT. Ke znovu smáčení topného povrchu dojde až v bodě E na Obr. 2, kdy

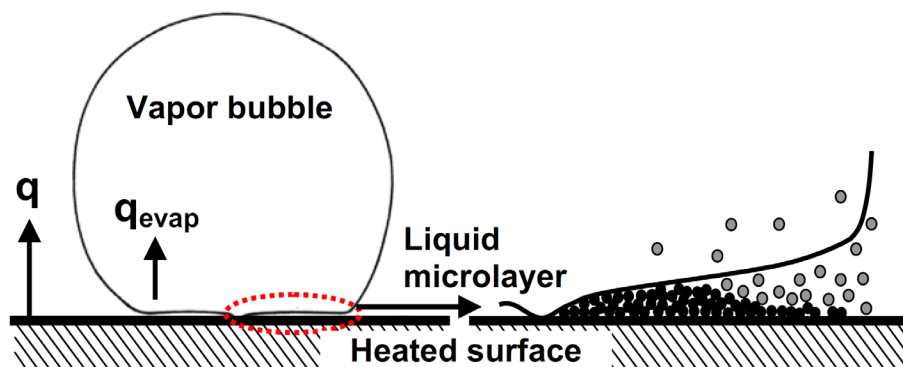
teplota povrchu klesne pod tzv. Leidenfrostovu teplotu a dojde k rozpadu souvislého parního filmu.

Mechanismus přenosu tepla se změní z blánového varu na bublinkový a rapidně klesne teplota povrchu kvůli nárůstu koeficientu přestupu tepla při bublinkovém varu.

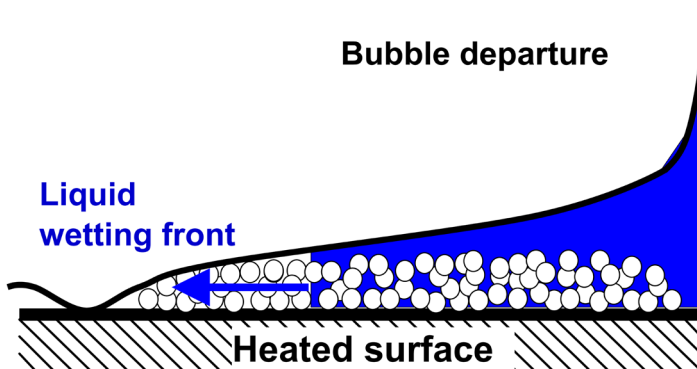
Ve zkratce, křivka varu pro zařízení s nezávislým tepelným výkonem vykazuje hysterezní chování s KTT jako horní hranicí bublinkového varu při zvyšujícím se tepelném toku a Leidenfrostovým bodem jako spodním limitem blánového varu při snižování tepelného výkonu. Obě meze odpovídají náhlým změnám v mechanismu varu z bublinkového na blánový při KTT zapříčiňující vyschnutí a zpětné smáčení povrchu při Leidenfrostově bodě.

S oblastí přechodového blánového varu se můžeme setkat pouze v zařízeních s řízenou teplotou povrchu. V těchto případech můžeme pozorovat snížení přenášeného tepelného toku při překročení teploty odpovídající KTT a klesající trend až k teplotě Leidenfrostova bodu. Tyto hodnoty byly experimentálně naměřeny s pomocí testovací sekce vnitřně vytápěné sytou parou o různých parametrech.

V zařízeních, jako je jaderný reaktor, je oblast přechodového blánového varu nestabilní, protože pro jednu hodnotu tepelného výkonu existují dva stabilní provozní režimy. Proto je na Obr. 2 tato oblast vyznačena čárkovaně.



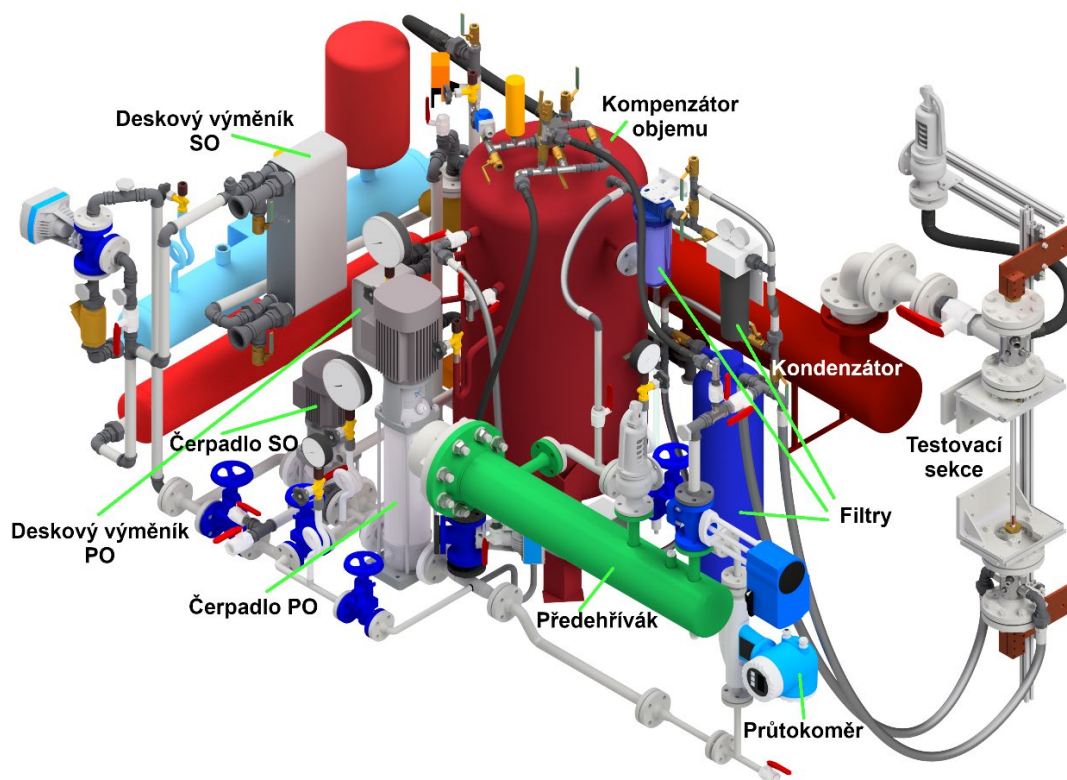
Obr. 3 Mechanismus depozice nanočástic na vyhřívaném povrchu[4]



Obr. 4 Mechanismus zvýšení KTT vlivem povlaku z nanočástic (dominantní smáčivost) [4]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Vývoj nového experimentálního zařízení pro výzkum kritických tepelných toků vznikl jako mezifakultní projekt Odboru energetického inženýrství Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství (FSI) a Ústavu elektroenergetiky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií (FEKT). Od 29. 9. 2017 je zařízení umístěno v laboratořích FEKT.



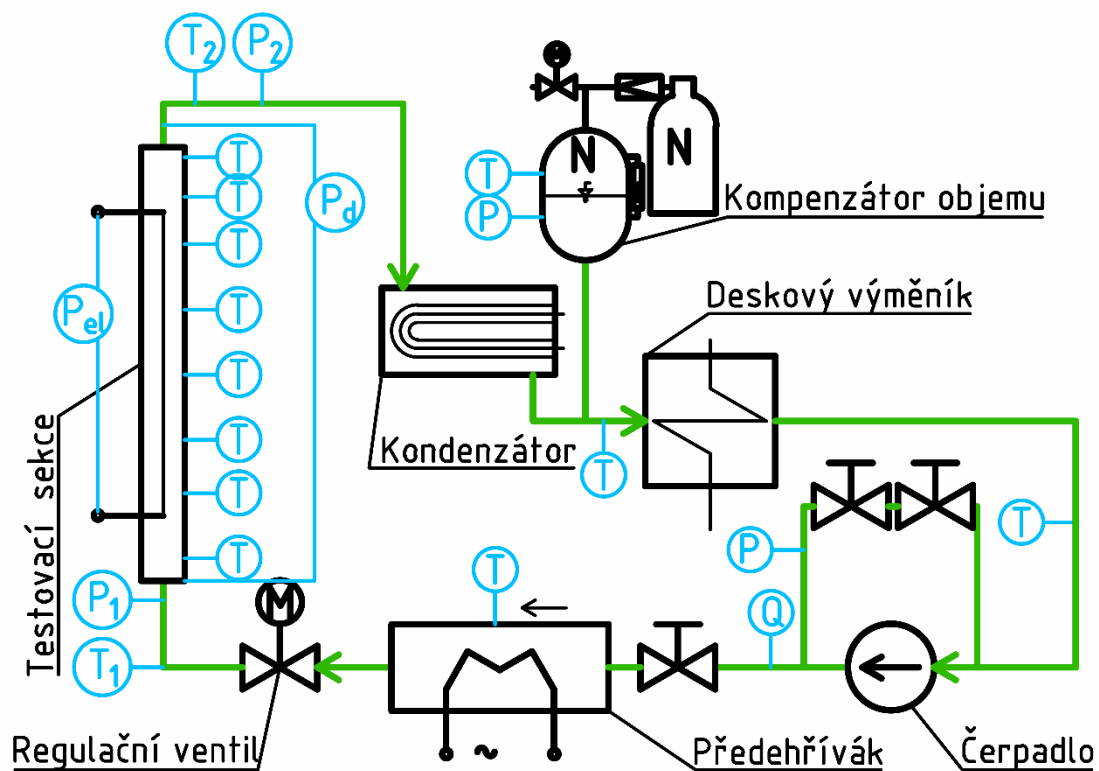
Obr. 5 - 3D model realizované varianty bez pomocné technologie a konstrukcí

Tab. 1 Provozní parametry experimentální smyčky

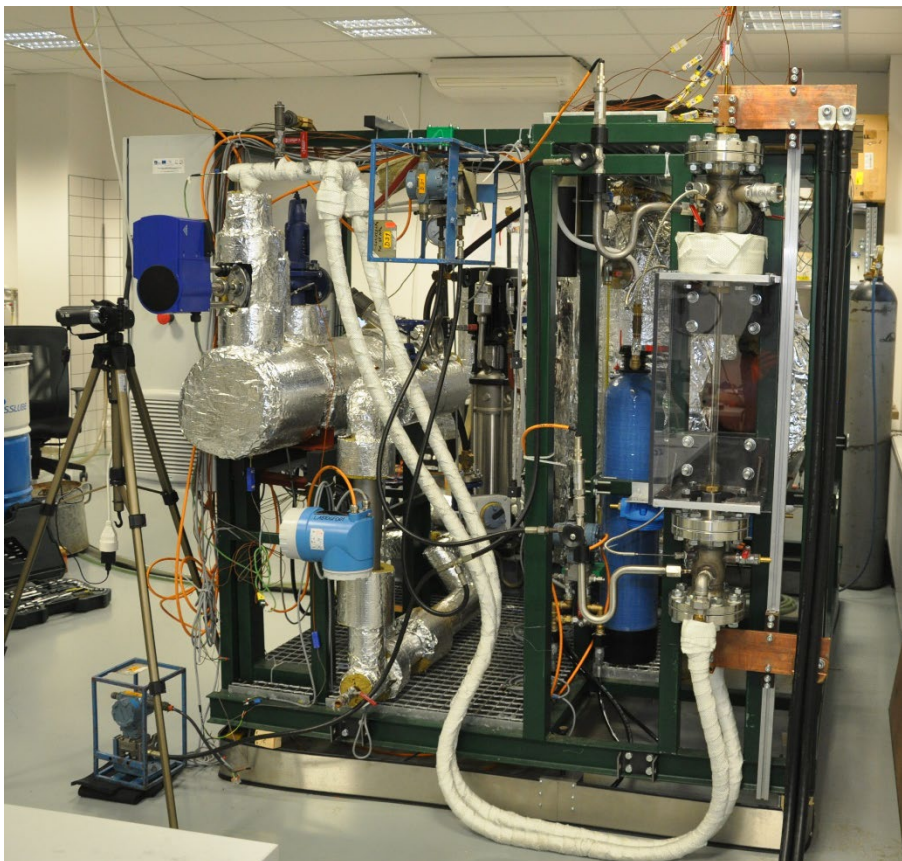
Veličina	hodnota	jednotka
Pracovní médium	demí voda	-
Rozsah pracovních tlaků v testovací sekci	0,1-1,5	MPa
Maximální teplota média	198,3	°C
Vstupní teplota do testovací sekce	45-195	°C
Maximální škrcení média do testovací sekce	1,5	MPa
Maximální tlak za čerpadlem	2,5	MPa
Průtok testovací sekcí	0,026-0,66	kg/s
Maximální odváděný tepelný výkon při	100	kW
Výkon přehříváku	19,2	kW
Průměr topené trubky	8-24,5	mm
Průměr obálkové trubice	12-69,3	mm
Délka topené trubky	0,05-2,5	m



Obr. 6 Pohled na sekundární okruh experimentální smyčky a řídicí stanoviště.



Obr. 7 Zjednodušené schéma primárního okruhu



Obr. 8 Pohled na přední část experimentální smyčky s testovací sekci.

3.1 TESTOVACÍ SEKCE

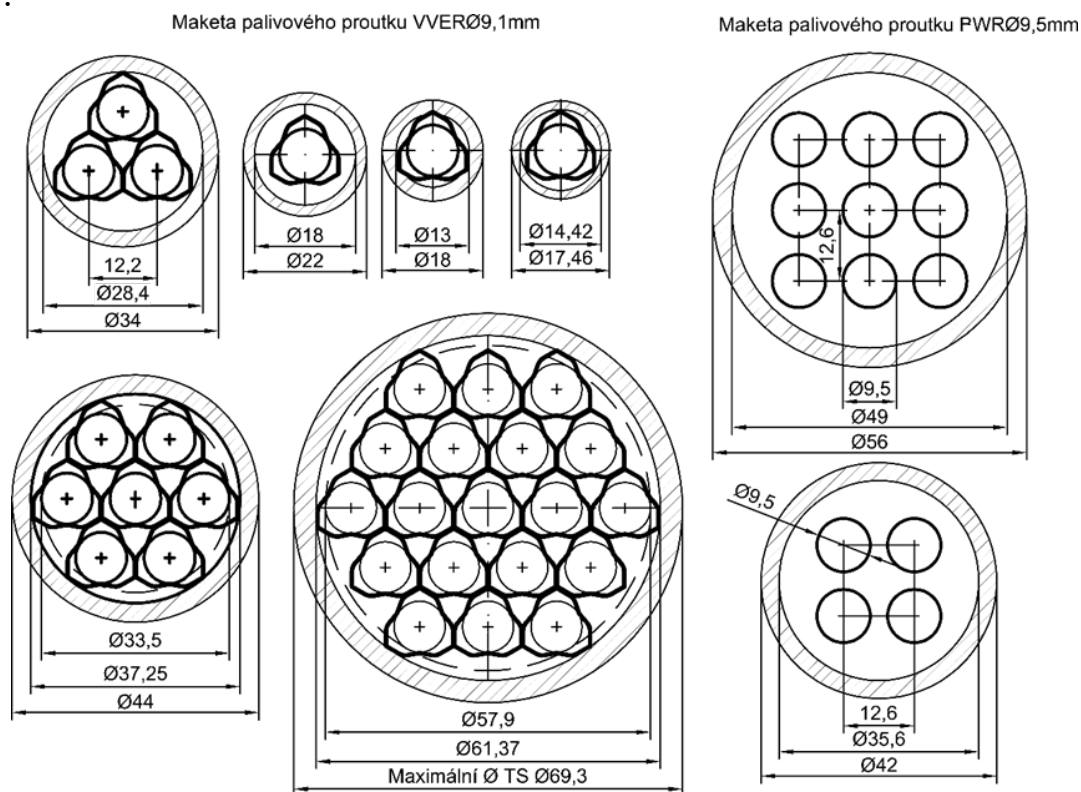
Testovací sekce pro experimenty kritického tepelného toku při konvektivním varu je navržena jako vertikální mezikruhový kanál. Kapalina proudí mezikruhovou mezerou směrem vzhůru, stejně jako v jaderném reaktoru. Přehled základních požadavků je uveden v Tab. 2.

Tab. 2 Základní požadavky na návrh testovací sekce

- | | |
|----|--|
| 1. | Vytápění makety jaderného paliva přímým průchodem stejnosměrného proudu |
| 2. | Vertikální mezikruží s vnitřně vytápěnou trubicí |
| 3. | Průměr vnitřní trubky stejný jako průměr reálného palivového proutku |
| 4. | Možnost přímé vizualizace režimů varu |
| 5. | Jednoduchá vzájemná vyměnitelnost testovaných vzorků |
| 6. | Jednoduchá změna testované geometrie bez nutnosti změny celé testovací sekce |

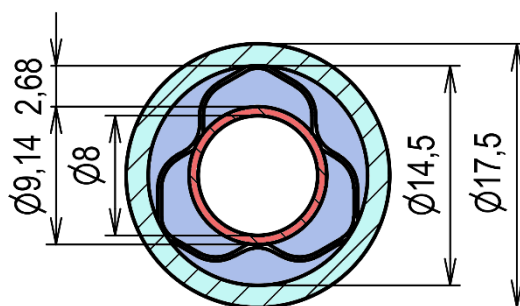
Termohydraulické procesy v jaderném reaktoru nejlépe postihuje plnorozměrový experiment. Vzhledem k vysoké finanční náročnosti bývá přistoupeno k jednotlivým zjednodušením. Plnorozměrové experimenty za provozního tlaku, průtoku i teploty

jsou prováděny na svazcích trubek v geometrické formaci reflektující část palivové kazety.



Obr. 9 Přehled možných geometrií pro základní těleso testovací sekce.

Experimenty kritického tepelného toku s plnou délkou a větším počtem proutků jsou velice náročné na spotřebu elektrické energie. Tento fakt klade vysoké nároky na přípojku elektrického vedení do laboratoří. Vzhledem k omezenému rozpočtu a limitům možností laboratoře (přípojka 3x400V 200A) bylo přikročeno k realizaci experimentů KTT pouze na jednorutové geometrii Obr. 10. Ovšem pro maximální využitelnost experimentálního zařízení i pro jiné druhy experimentů (zákrizové experimenty při vyšším tlaku apod..) byla zvolena modulární koncepce testovací sekce. Ta umožňuje výměnou přírub modifikaci experimentu s minimem svářečských prací.



Obr. 10 Průřez testovacího kanálu s distanční mřížkou při vzorku IN1.

Jednotlivé průřezy testovacích kanálů, které by se daly aplikovat na testovací sekci, jsou znázorněny na Obr. 9. V levé části obrázku jsou patrné palivové proutky

udržované v geometrické formaci pomocí distančních mřížek používaných v reaktorech VVER-440. V pravé části obrázku je znázorněna testovací geometrie používaná v reaktorech PWR s čtvercovou palivovou mříží. V případě užití víceprutové makety jaderného paliva by bylo nutné navrhnout novou konstrukci přírodních vodičů a ucpávek elektrod.

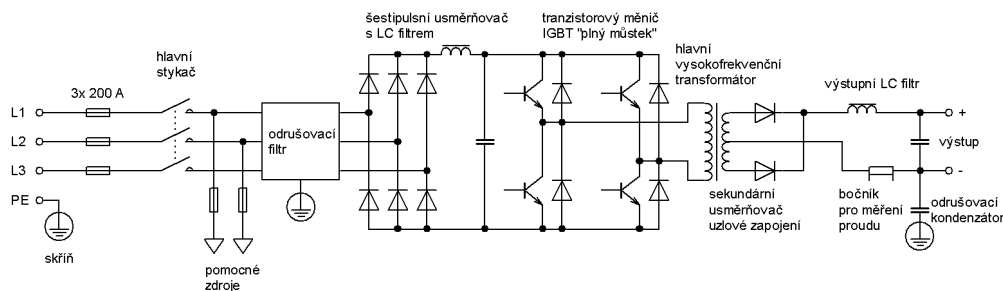
Testovací sekce na Obr. 12 je navržena jako modulární. Jednotlivé části se dají měnit podle potřeb experimentu. Při změně venkovní skleněné trubice za jinou do $\phi 34$ mm se mění pouze nerezová matice, mosazný šroub ucpávky a sada teflonových těsnění s o-kroužkem, bez nutnosti demontovat celou přírubu.

Kapalina vstupuje do spodní části dvěma hrdly a proudí přes nevytápěný ustalovací úsek, kde je vyústěno měření teploty a tlaku. Měření teploty je provedeno odporovým teplotním čidlem PT100 s průměrem 3mm. Toto čidlo je v přímém kontaktu se vstupní kapalinou pro co nejrychlejší měřicí odezvu. Průchod čidla je těsněn kuželovým svěrným kovovým těsněním. Tlakový odběr je realizován přes zahnutou kondenzační smyčku ČSN 137530.A.3. Spodní příruba vstupního úseku je středěná s tělesem přes teflonový segment, kterým prochází kladná vstupní elektroda. Tato elektroda prochází kuželovou PTFE ucpávkou, izolačním PTFE pouzdem přes středící PTFE segment. Tyto izolační segmenty by měly odizolovat kladný potenciál od kostry zařízení. Pro případ poruchy této elektrické izolace je odizolována i spodní příruba.

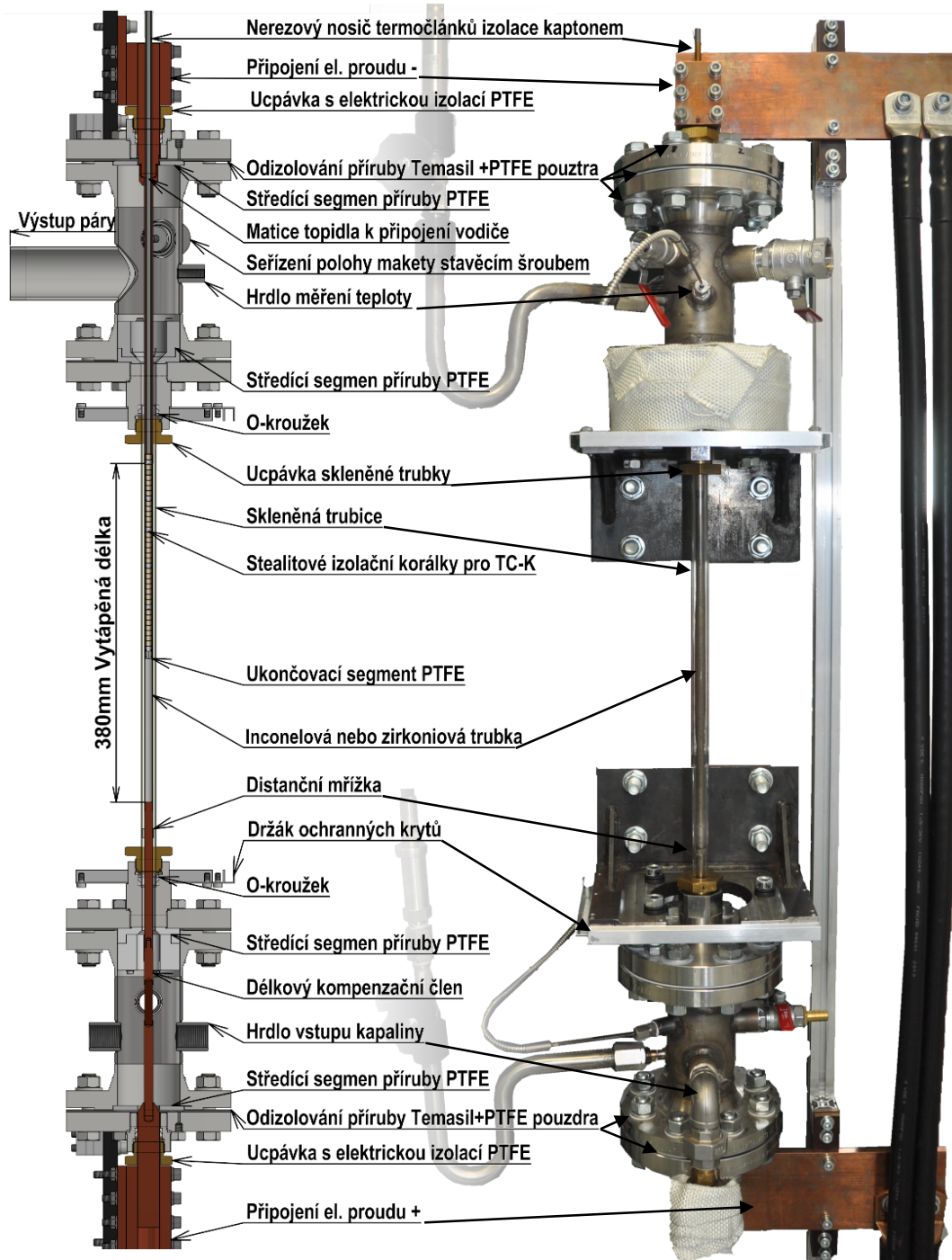
3.2 ZDROJ STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU

Vzhledem k vysoké finanční náročnosti komerčních produktů a specifickým požadavkům experimentu na napájecí zdroj bylo přikročeno k vývoji vlastního zdroje stejnosměrného proudu přesně pro potřeby experimentů. Zdroj byl navrhnut, vyroben a odzkoušen v laboratořích Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT.

Zdroj je koncipován tak, aby byl schopen plně využít maximální výkon, který je dostupný pro laboratoř (přípojka 3x 400 V 200 A). Zdroj je schopen provozu ve třech režimech definovaných testovaným vzorkem (65 V / 1500 A, 100 V / 1200 A, 400 V / 300 A). V případě použití zirkoniové trubičky pokrytí jaderného paliva je třeba pro dosažení tepelného toku $3,9 \text{ MW/m}^2$ zajistit proud 1500A. Při použití nerezové makety je třeba pro dosažení tepelného toku $3,9 \text{ MW/m}^2$ zajistit proud 1235 A.



Obr. 11 Základní schéma silové části napájecího DC zdroje.



Obr. 12 Řez testovací sekci

3.3 INSTRUMENTACE A PŘESNOST MĚŘIDEL

Nejdůležitějšími parametry, které přímo ovlivňují opakovatelnost a reprezentovatelnost naměřených kritických tepelných toků jsou:

- Tepelný výkon
- Hmotnostní tok
- Teplota kapaliny na vstupu a výstupu z testovací sekce
- Tlak na vstupu a výstupu z testovací sekce

Tepelný výkon byl měřen na elektrické straně měřením úbytku napětí na bočníku (60 mV 2000 A 0,5 %) kartou NI9238. Hmotnostní průtok byl měřen průtokoměrem Promass80F15 DN 15 od výrobce Endress+Hauser. Teplota kapaliny na vstupu a výstupu z testovací sekce byla měřena odporovým teplotním čidlem MTR11 Pt100 s ϕ 3 mm. Tlak na vstupu a výstupu z testovací sekce byl měřen tlakovými snímači DMP 331i od výrobce BD SENSORS. Pro záznam vizualizace proudění byla použita videokamera SONY HDR-CX240E.

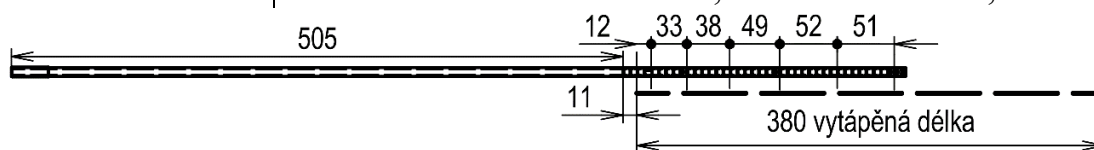
Pro detekci KTT sloužila sonda měření vnitřní teploty makety jaderného paliva. Byla složena z až 14 stíněných termočlánků typu K o průměru 0,5mm(OMEGA TJC-158-CA-SS-020U-od23palců do 63 palců), které byly přitlačovány na vnitřní stěnu makety pomocí stealitových izolačních korálků s vybroušenou drážkou, viz Obr. 16. V průběhu experimentů došlo k 4 modifikacím sondy za účelem zvýšení teplotní odolnosti a zlepšení detekce KTT. Konečná podoba je zobrazena na Obr. 14 s detailem vyústění termočlánků na Obr. 15. Termočlánky byly po výšce makety rozmístěny dle Obr. 13.

Tab. 3 Nejistoty měření

Měřená veličina	Symbol	Rozsah čidel	Rozsah použitý v této práci	Jednotka	Nejistota měření výsledků použitých v této práci
Tlak	P	0-20	1-3	bar a	$\pm 0,0278$ bar
Teplota	T	0-200	20-150	°C	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
Teplota v TS	T	0-1260	20-400	°C	$\pm 2,7^{\circ}\text{C}$
Výkon	P_{el}	0-120	0-30	kW	$\pm 0,6\%$ z m. h.
Tepelný tok	q	0-4	0-3,5	MW/m ²	$\pm 1,7\%$ z m. h.
Hmotnostní průtok	M	2-121		kg/min	$\pm 0,449\%$ z m. h.
Hmotnostní tok	G	400-20000	400-1000	kg/m ² s	$\pm 3,7\%$ z m.h.

Tab. 4 Rozptyl konstantních parametrů všech experimentů KTT

Parametr	Požadovaná veličina	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Hmotnostní tok G [kg/m ² s]	400	399,22	5,1
	500	499,17	1,5
	600	597,68	3,1
	800	797,30	3,4
Vstupní teplota t_{in} [°C]	64	64,07	0,43
	80	78,30	1,43
	91	90,93	1,76
Tlak na výstupu z TS P_{out} [kPa]	120	122,2	4,3
	200	199,2	12,5
	300	299,1	13,1



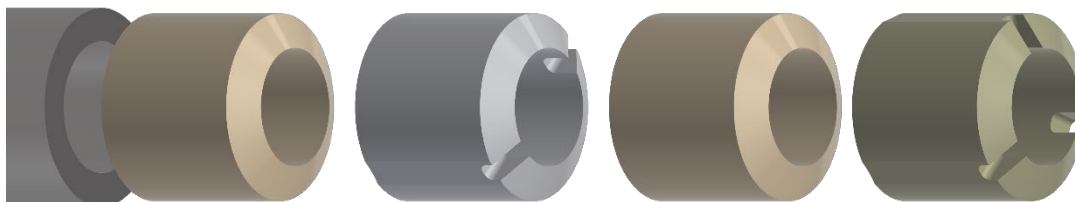
Obr. 13 Rozmístění termočlánků čtvrté verze sondy



Obr. 14 Čtvrtá verze sondy před instalací do Zirkoniové makety



Obr. 15 Detail vyústění termočlánků čtvrté verze makety



Obr. 16 Detail kontaktu nosné trubky s izolačními segmenty pro měření teploty ve spoji a na konci vytápěné části makety.

3.4 METODIKA MĚŘENÍ KRITICKÉHO TEPELNÉHO TOKU

Před experimenty KTT je třeba uvést smyčku do provozního stavu filtrací a odplyněním pracovního média.

Hodnota pH během experimentů se pohybovala od 9,3 do 9,5 ($\pm 0,05$), elektrická vodivost od 26 do 31 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($\pm 2\%$ F. S.).

Díky nekontinuálnímu měření a odměrné nádobě s volnou hladinou se dá předpokládat, že reálná hodnota rozpuštěného kyslíku byla po odplynění nižší než 0,81 mg/l. Hodnota rozpuštěného kyslíku doplňkové demivody z reverzní osmózy byla 6,5 mg/l.

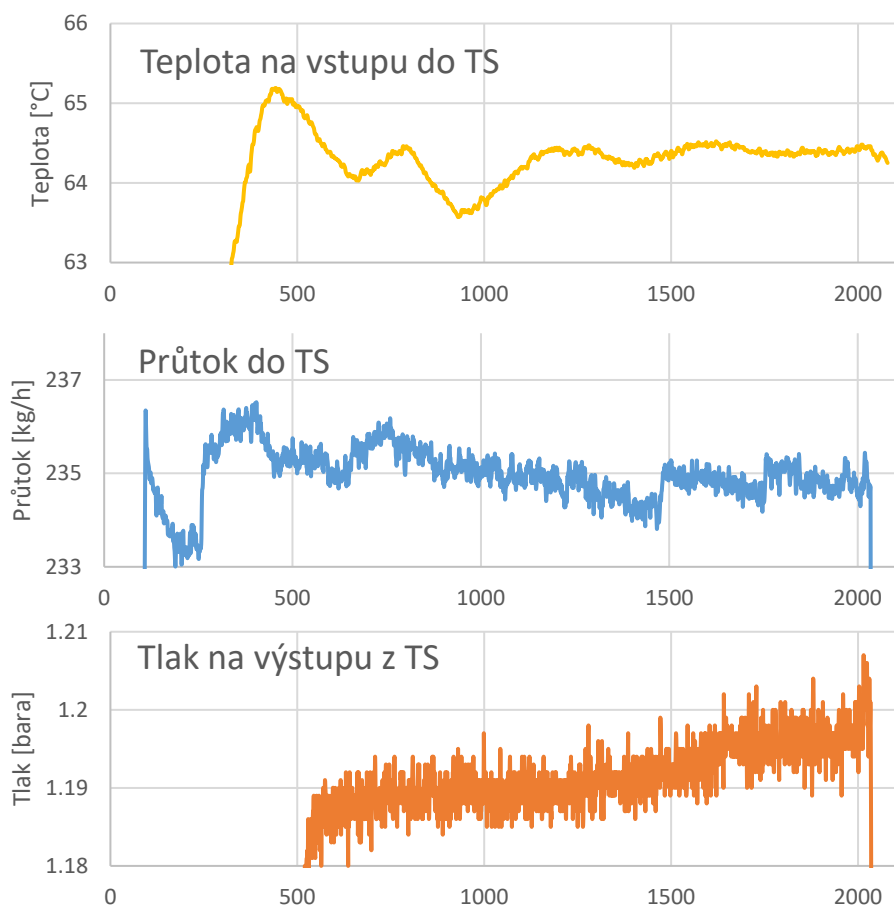
Typický průběh měření jednoho bodu KTT za konstantních podmínek vstupní teploty, výstupního tlaku, hmotnostního průtoku a tlakové ztráty mezi výtlakem čerpadla a vstupem do TS, viz Obr. 17. Nastavení vstupních parametrů se odehrává v čase 0 až 500 s. Po ustálení vstupních parametrů a nahřátí horní části testovací sekce s kondenzátorem se tepelný výkon zvyšuje tak dlouho, dokud není dosaženo charakteristického překročení limitů teploty uvnitř makety. Pokud se limitů dosáhne bez charakteristického strmého vzrůstu teploty, tak se experiment opakuje se zvýšeným limitem maximální teploty vnitřní stěny. Se zvyšujícím se topným výkonem, jak je zobrazeno na Obr. 18, se zvyšují i závislé parametry, jako teplota vnitřního povrchu makety a tlaková ztráta na TS, viz Obr. 19.

Na obrázcích Obr. 17, Obr. 18 a Obr. 19 je zobrazen experiment na 365 mm dlouhém zirkoniovém vzorku při parametrech uvedených v Tab. 5

Tab. 5 Parametry experimentu

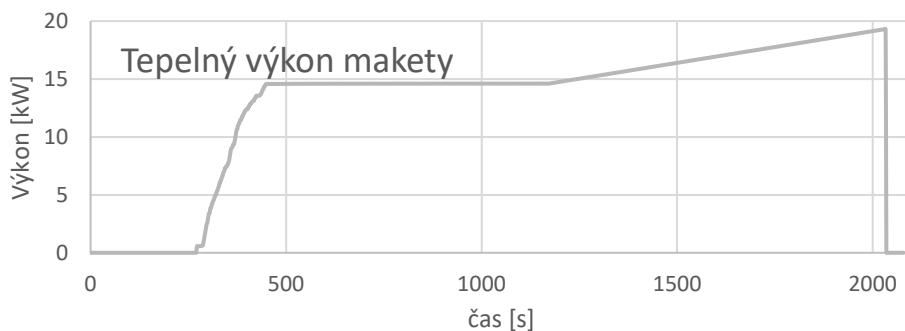
Provozní parametr	Hodnota
Teplota na vstupu do TS (HHZ10CT001)	65 °C
Tlak na výstupu z TS (HHZ10CP002)	1,2 bara
Průtok TS (LAB10CF001)	234,9 kg/h
Hmotnostní tok G	600 kg/m ² s
Tlaková ztráta mezi čerpadlem a TS	6 až 8 bar

Pro dosažení potřebné opakovatelnosti a snížení náročnosti na obsluhu je posloupnost úkonů naprogramována v řídicím programu. V jeho průběhu je operátoru umožněno zasahování do některých parametrů experimentu.

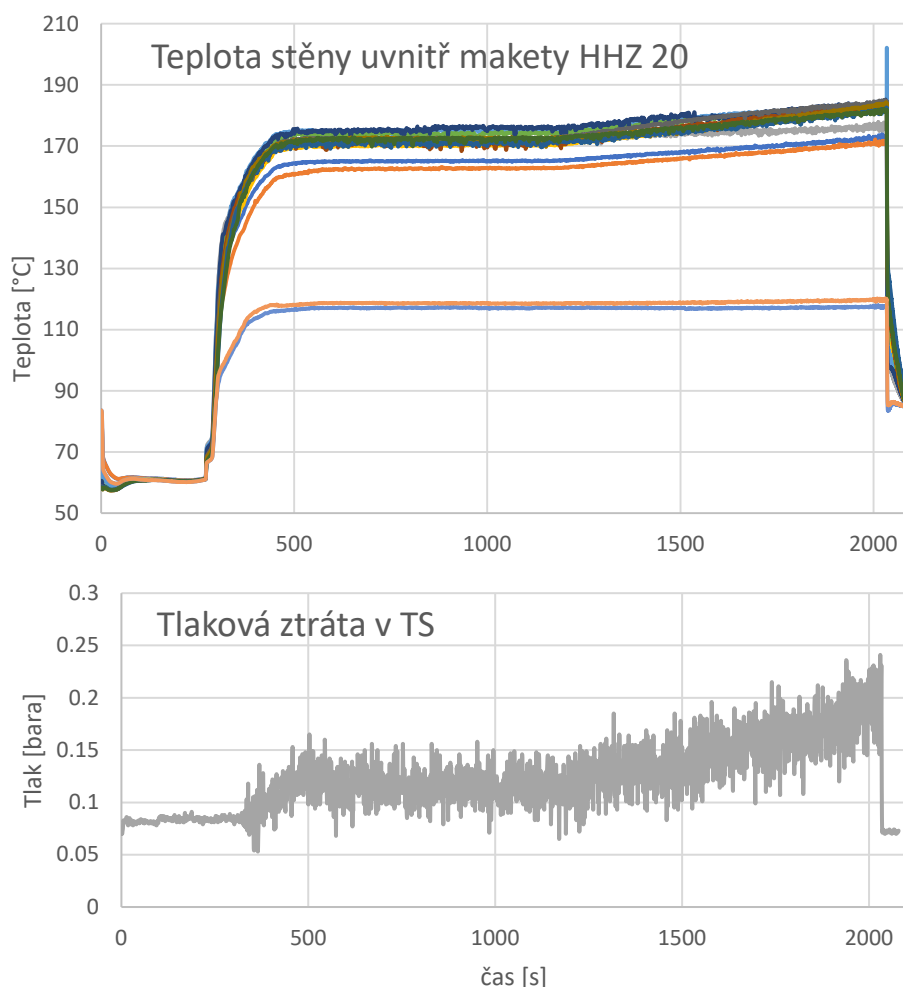


Obr. 17 Parametry, které by měly být v průběhu experimentu konstantní

Pokud během předchozího experimentu nedošlo k žádnému poškození je smyčka ihned po vizuální kontrole TS připravena k dalšímu spuštění experimentu. Průměrná doba trvání jednoho experimentu se pohybovala okolo 40 minut. V případě změny konstantních experimentálních parametrů se prodlužuje oblast ustalování vstupních parametrů před zapnutím zdroje DC proudu z času 0-270 s až na 0-1000 s.



Obr. 18 Nastavovaný tepelný výkon makety jaderného paliva

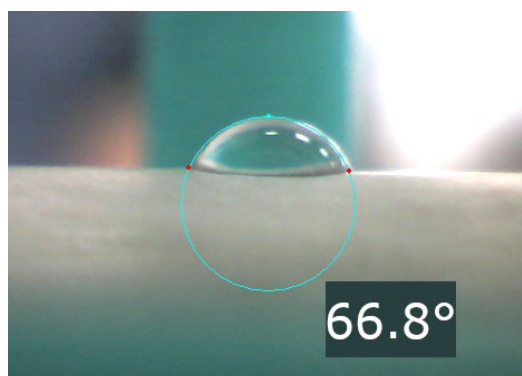


Obr. 19 Parametry závislé na zadávaném tepelném výkonu.

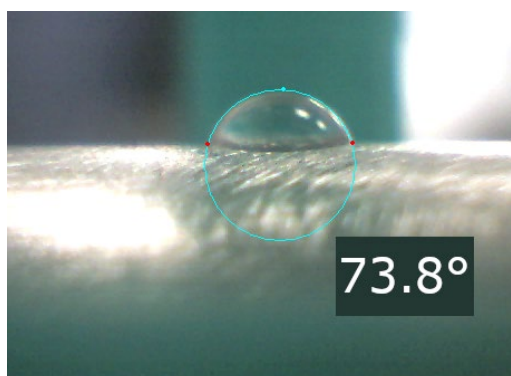
Běžný denní provoz experimentálního zařízení se skládal z 2 hodin filtrace, 2 hodin odplynění a 8 hodin experimentů, během kterých bylo naměřeno 6 až 13 hodnot KTT. V případě výměny testovaného vzorku bylo třeba TS vychladit pod 40 °C. Výměna trvala od 4 do 72 hodin podle počtu závad na měřicí aparatuře.

3.5 SMÁČIVOST POVRCHU A STATICKÝ KONTAKTNÍ ÚHEL

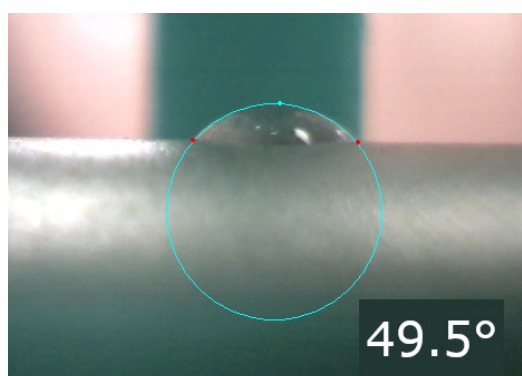
Smáčivost povrchu byla měřena na přístroji See System E od firmy Advex Instruments s.r.o. podle normy ČSN EN 828.



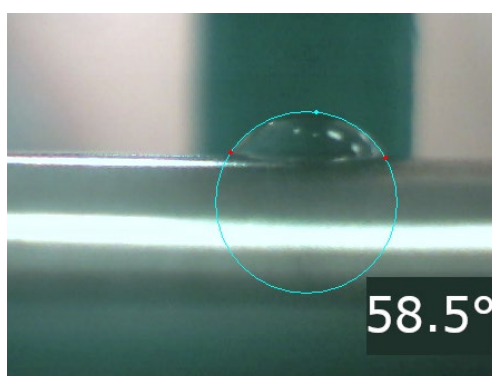
Obr. 20 Kontaktní úhel technicky hladké trubky z Inconelu™ 625



Obr. 21 Kontaktní úhel obroušené trubky z Inconelu™ 625 brusným plátnem hrubosti 150zrn/cm²



Obr. 22 Kontaktní úhel balotínování trubky z Inconelu™ 625

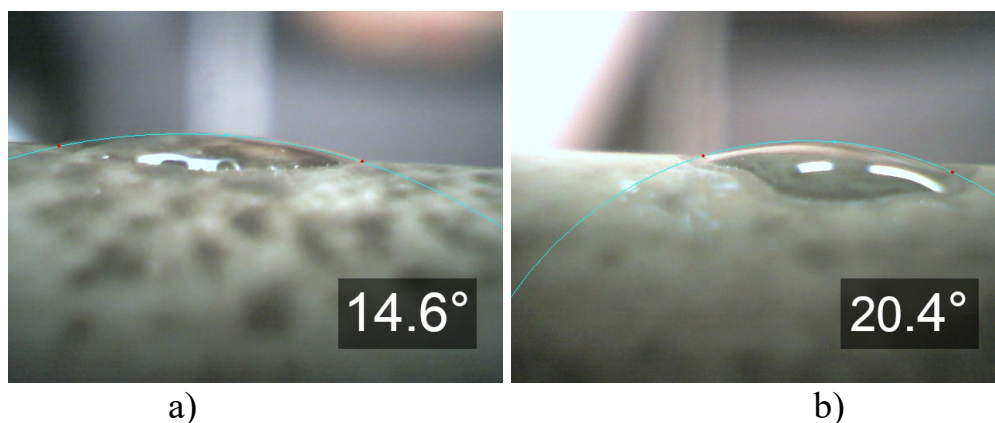


Obr. 23 Kontaktní úhel technicky hladké trubky ze Zr-slitiny

Tab. 6 Kontaktní úhel testovaných materiálů

Materiál	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Technicky hladká Inconel™ 625	66,4°	7,7°
Broušená Inconel™ 625	73,3°	6,2°
Balotínovaná Inconel™ 625	49,7°	5,5°
Zr-slitina	59,2°	7,3°

V průběhu experimentů na hladkém povrchu bylo pozorováno zvýšení KTT s varným časem. Po ukončení experimentu na hladkém Inconelovém povrchu byl vzorek do 24 hodin podroben analýze, která prokázala zvýšení smáčivosti vlivem oxidické vrstvy na varném povrchu. Data z měření zobrazena na Obr. 24 a Tab. 7. Dále bylo pozorováno zvýšení hodnot struktury povrchu následkem varu, výsledky zobrazeny v Tab. 8 a Tab. 9.



Obr. 24 Kontaktní úhel technicky hladkého povrchu Inconelu™ po 25 hodinách a 23 minutách varu
a) snímek povrchu ze softwaru See System E s kontaktním úhlem 14,6° b) snímek povrchu s kontaktním úhlem 20,4°

Tab. 7 Srovnání kontaktního úhlu technicky hladké Inconelové trubky před a po experimentech KTT

Materiál	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Technicky hladká Inconel™ 625	66,4°	7,7°
Technicky hladká Inconel™ 625 po 25 hodinách a 23 minutách varu	17,1°	5,1°

Tab. 8 Průměrné hodnoty struktury povrchu

Materiál	Rz[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	Rsm[μm]
Technicky hladká Inconel™ 625 (IN)	2,477	3,205	0,329	79,999
Broušená Inconel™ 625 (IN150)	7,014	7,905	0,702	70,417
Balotinovaná Inconel™ 625 (INB)	6,844	9,650	0,937	86,554
Zr-slitina	4,240	5,703	0,374	80,523

Tab. 9 Porovnání struktury povrchu vzorku INB před a po experimentech KTT

Parametr	Rz[μm]	Rt[μm]	Ra[μm]	Rsm[μm]
INB před experimenty KTT	6,844	9,650	0,937	86,554
INB po experimentech KTT povrch prošel teplotou do 400 °C	8,542	11,629	1,155	94,442
INB po experimentech KTT povrch prošel teplotou přes 600 °C	10,946	14,884	1,471	114,336

4 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ NA HLADKÉM POVRCHU

Pro validaci nové experimentální smyčky bylo přikročeno k volbě parametrů co nejvíce odpovídajících práci Haase[1]. Přehled konstantních parametrů, při kterých byly experimenty provedeny, je uveden v Tab. 10.

Vstupní podchlazení mělo být pro co nejlepší srovnání při všech experimentech 167 kJ/kg, ovšem díky měření regulátoru teploty těsně za předehřívákem pro co nejmenší dopravní zpoždění, a 2,5m dlouhé dopravní trase z předehříváku do TS tvořené dvěma EPDM hadicemi s vnitřním ocelovým opletem, byla měřena na vstupu do TS nižší teplota než nastavená regulátorem. Hodnota tohoto rozdílu byla objevena až při analýze dat z měření technicky hladké Inconelové makety, pro co nejlepší opakovatelnost a porovnatelnost s ostatními povrchy bylo přikročeno k ponechání nastavení regulátoru.

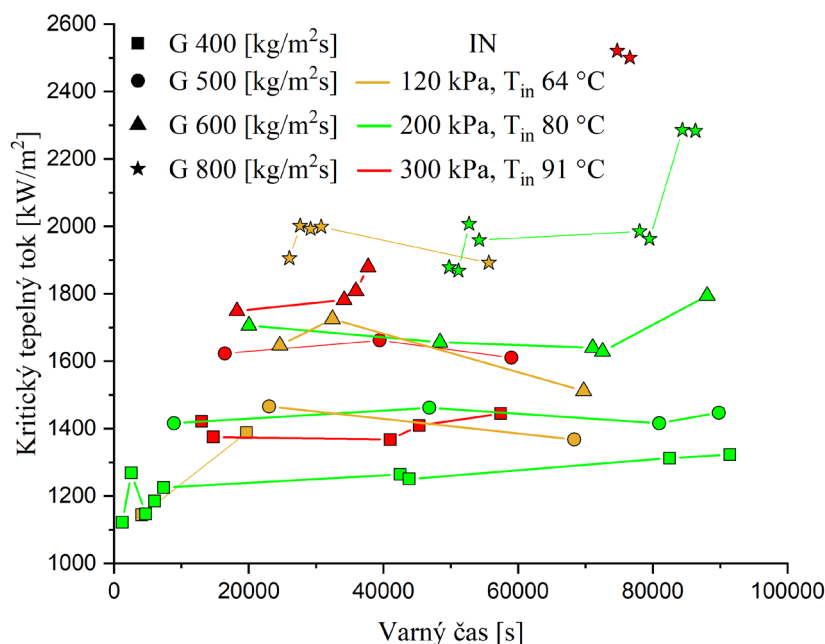
Tab. 10 Podmínky experimentů na technicky hladkém Inconelu 625

Tlak na výstupu z TS P_{out} [kPa]	Vstupní teplota t_{in} [°C]	Vstupní podchlazení Δh_{in} [kJ/kg]	Hmotnostní tok G [kg/m ² s]
120	64	171	400, 500, 600, 800
200	80	170	400, 500, 600, 800
300	91	180	400, 500, 600, 800

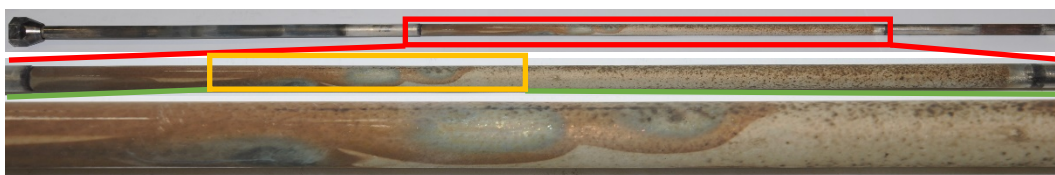
Vstupní podchlazení bylo pro všechny experimenty při daném tlaku shodné.

Tab. 11 Rozptyl konstantních parametrů všech experimentů KTT

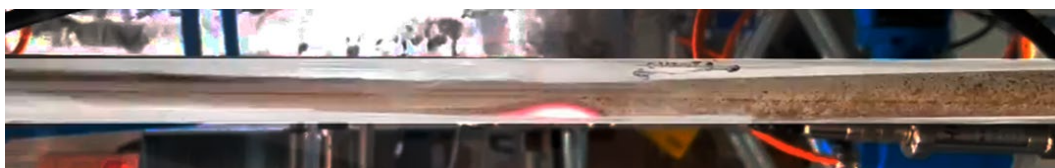
Parametr	Požadovaná veličina	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Hmotnostní tok G [kg/m ² s]	400	399,22	5,1
	500	499,17	1,5
	600	597,68	3,1
	800	797,30	3,4
Vstupní teplota t_{in} [°C]	64	64,07	0,43
	80	78,30	1,43
	91	90,93	1,76
Tlak na výstupu z TS P_{out} [kPa]	120	122,2	4,3
	200	199,2	12,5
	300	299,1	13,1



Obr. 25 Závislost KTT na varném čase pro vzorek technicky hladkého Inconelu™ 625 při různých hmotnostních průtocích a provozních tlacích



Obr. 26 Vzorek IN150 po experimentech KTT patrná různá pozice výskytu KTT a lokálního přehřátí.



Obr. 27 Ohnutí testovaného vzorku vlivem KTT s lokálním přehřátím povrchu nad 600°C, v případě trvalého ohnutí vzorku bylo nutné experimenty na daném vzorku ukončit pro nereprezentativní geometrii varného kanálu.

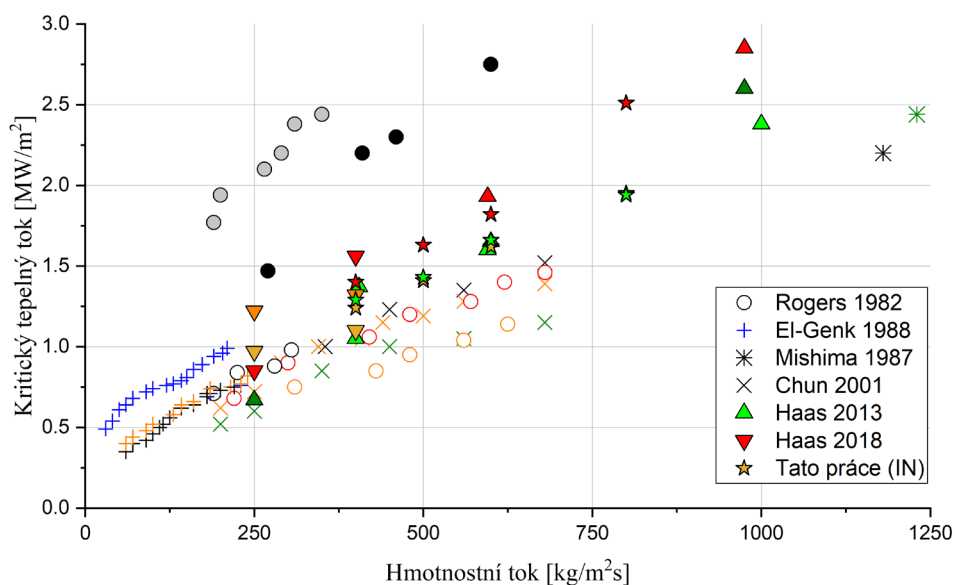
V průběhu experimentálních prací byla pozorována průběžná změna barvy varného povrchu. V první fázi se na varném povrchu začali objevovat tmavé tečky v oblasti nukleačních jader. V další fázi se stříbrný povrch začal pokrývat souvislou šedou vrstvou. Tato vrstva se při přehřátí povrchu nad 600°C zbarvovala do hněda. K tomuto přehřátí docházelo v případech, kdy krize vznikla mezi termočláňky, a proto byla její detekce opožděna. K přehřátí nikdy nedošlo nad termočláňkem nebo v jeho nejbližším okolí (do 3mm).

Tab. 12 Podmínky experimentů KTT na technicky hladkém povrchu

Tlak na výstupu z TS P_{out} [kPa]	Vstupní teplota t_{in} [°C]	Vstupní podchlazení Δh_{in} [kJ/kg]	Hmotnostní tok G [kg/m ² s]
120	64	171	400, 500, 600, 800
200	80	170	400, 500, 600, 800
300	91	180	400, 500, 600, 800

Tab. 13 Porovnání výsledků měření KTT na technicky hladkých vzorcích

P_{out} [kPa]	G [kg/m ² s]	400	500	600	800
120	IN [kW/m ²]	1241	1416	1628	1958
	Zr-slitina [kW/m ²]	1253	1549	1764	2010
	Δ Zr-slitina-IN [kW/m ²]	12	133	136	52
	Δ Zr-slitina/IN [%]	0,97%	9,39%	8,35%	2,66%
200	IN [kW/m ²]	1300	1435	1668	1944
	Zr-slitina [kW/m ²]	1344	1523	1772	2144
	Δ Zr-slitina-IN [kW/m ²]	44	88	104	200
	Δ Zr-slitina/IN [%]	3,38%	6,13%	6,24%	10,29%
300	IN [kW/m ²]	1402	1632	1805	2510
	Zr-slitina [kW/m ²]	1401	1581	1783	2063
	Δ Zr-slitina-IN [kW/m ²]	-1	-51	-22	-447
	Δ Zr-slitina/IN [%]	-0,07%	-3,13%	-1,22%	-17,81%



Obr. 28 Porovnání naměřených dat na technicky hladkém Inconelu™ 625 s literaturou.

Autor	Tlak [kPa]	L/D_{he}	Δh [kJ/kg]
● Rogers	156	8.5	389
● Rogers	156	13.9	389
○ Rogers	156	20.2	389
○ Rogers	156	20.2	264
○ Rogers	156	20.2	180
+ El-Genk	118	20.1	222-270
+ El-Genk	118	13.1	235-270
+ El-Genk	118	26.6	231-270
* Mishima	100	11.5	124
* Mishima	100	11.5	19
× Chun	570	61.6	212
× Chun	570	61.6	353
× Chun	570	61.6	85
▲ Haas 2013	115	39.3	250
▲ Haas 2013	115	39.3	100
▲ Haas 2013	115	39.3	167
▼ Haas 2018	120	13.2	167
▼ Haas 2018	200	13.2	167
▼ Haas 2018	300	13.2	167
★ Tato práce (IN)	120	25.6	162-205
★ Tato práce (IN)	200	25.6	162-205
★ Tato práce (IN)	300	25.6	162-205

Tab. 14 Parametry experimentů, se kterými proběhlo srovnání

Experiment	P_{out} [kPa]	G [kg/m ² s]	Δh_{in} [kJ/kg]	L [mm]	d [mm]	D [mm]	L/d_{he}
Rogers a kol. [5]	156	60-648	180-389	480	13,1	22-30,2	8,5-20,2
El-Genk a kol.[6]	118	19,3-258	182-312	500	12,7	20-25,4	13,1-26,6
Chun a kol. [7]	570-15000	198-645	85-353	1842	9,54	19,4	61,6
Mishima a kol. [8]	100	528-4958	19-124	300	10	19	11,5
Haas a kol. malé mezikruží [1]	115-300	250-1000	100-250	326	9,5	13	39,3
Haas a kol. velké mezikruží[1]	115-300	250-400	104-250	326	9,5	18	13,2
Tato práce	115-300	400-800	170-180	380-365	9,14	14,8	25,6

5 KRITICKÉ TEPELNÉ TOKY NA MODIFIKOVANÉM POVRCHU

Při měření KTT na modifikovaných površích byl počet experimentů omezen, z důvodu minimalizování rizika poškození testovací sekce. Každý experiment KTT nese určité riziko spojené s termálním poškozením testovaného vzorku. V případě lokálního přehřátí s trvalým ohnutím již není možné pokračovat v experimentech, vzhledem ke změně geometrie testovací sekce. Toto poškození bylo hlavním faktorem, který ukončoval měření.

V Tab. 15 jsou uvedeny podmínky prováděných experimentů na modifikovaných površích. Každý experimentální bod se za konstantních parametrů opakoval 3 a ve výsledných tabulkách je uvedena průměrná hodnota vypočtená z naměřených hodnot, krom hodnot uvedených v závorkách. Tyto hodnoty byly doplňkové a výsledná hodnota je výsledkem pouze jednoho měření. Za fakt, že hodnota KTT pro 500 kg/m²s není naměřena na všech tlakových úrovních, může tepelné poškození zkoumaného vzorku v průběhu experimentu. Experimenty za hmotnostních toků 800 kg/m²s byly u modifikovaných povrchů zrušeny, z důvodu vyššího rizika poškození vzorku.

Rozptyl konstantních parametrů byl shodný s měřením hladkého povrchu, viz Tab. 11.

Tab. 15 Podmínky experimentů na modifikovaném povrchu InconelTM 625

Vzorek	Tlak na výstupu z TS P_{out} [kPa]	Vstupní teplota t_{in} [°C]	Vstupní podchlazení Δh_{in} [kJ/kg]	Hmotnostní tok G [kg/m ² s]
IN 150	120	64	171	400, (500), 600
	200	80	170	400, (500) 600,
	300	91	180	400, 600,
INB	120	64	171	400, 600,
	200	80	170	400, (500), 600,
	300	91	180	400, (500), 600,

Vzhledem k maximální odchylce naměřených KTT 100kW/m², byla brána jako průkazná hodnota zvýšení výkonu o maximální odchylku plus nejistota měření tepelného toku 1,68% z měřené hodnoty.

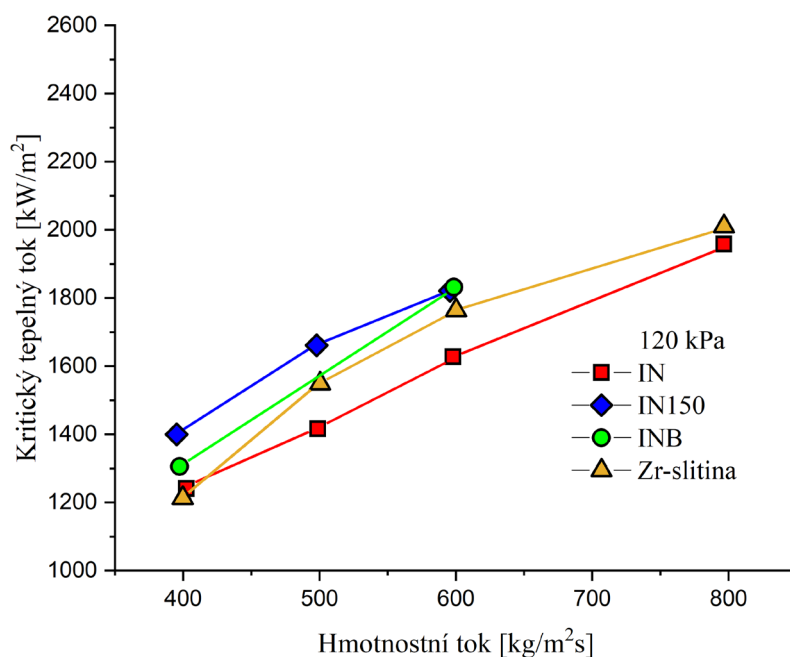
5.1 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ KTT NA MODIFIKOVANÝCH POVRŠÍCH

Oba modifikované povrchy vykazovaly zvýšení kritických tepelných toků v porovnání s technicky hladkou Inconelovou trubicí.

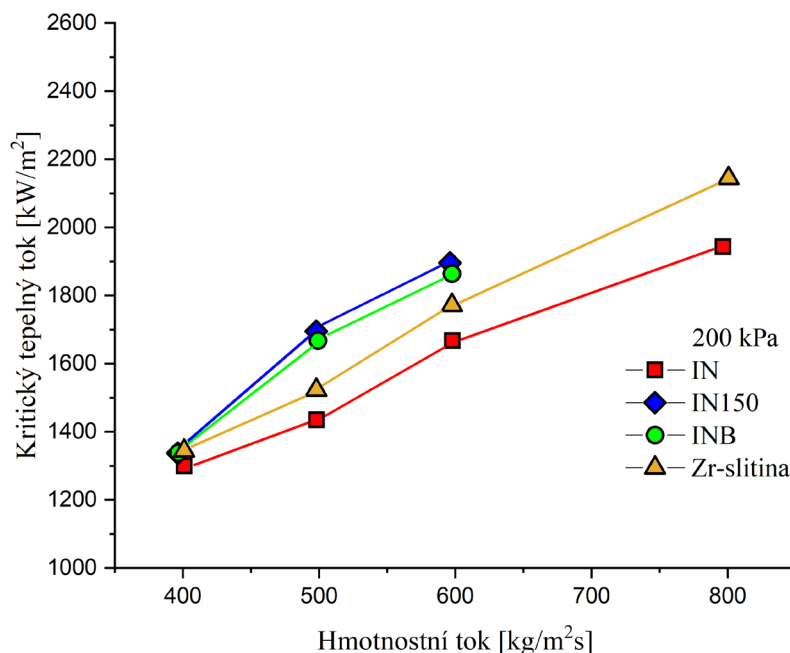
Tab. 16 Procentuální rozdíl zvýšení KTT na modifikovaném povrchu

P_{out} [kPa]	G [kg/m ² s]	Balotinovaná Inconel TM 625 (INB)	Obroušená Inconel TM 625 (IN150)
120	400	5,16%	8,62%
	500		17,30%
	600	12,53%	11,86%
200	400	3,00%	2,85%
	500	16,17%	18,12%
	600	11,75%	13,67%
300	400	4,99%	10,56%
	500	8,21%	
	600	14,90%	10,14%

V oblasti hmotnostních toků $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ bylo pozorováno zvýšení KTT nepřevyšující maximální odchylku KTT (100 kW/m^2) a nejistotu měření tepelného toku. Průkazné zvýšení KTT v této oblasti bylo pozorováno pouze u obroušeného povrchu IN150 při tlaku 300 kPa, viz Obr. 31.



Obr. 29 Porovnání KTT všech testovaných vzorků při tlaku na výstupu z testovací sekce 120 kPa

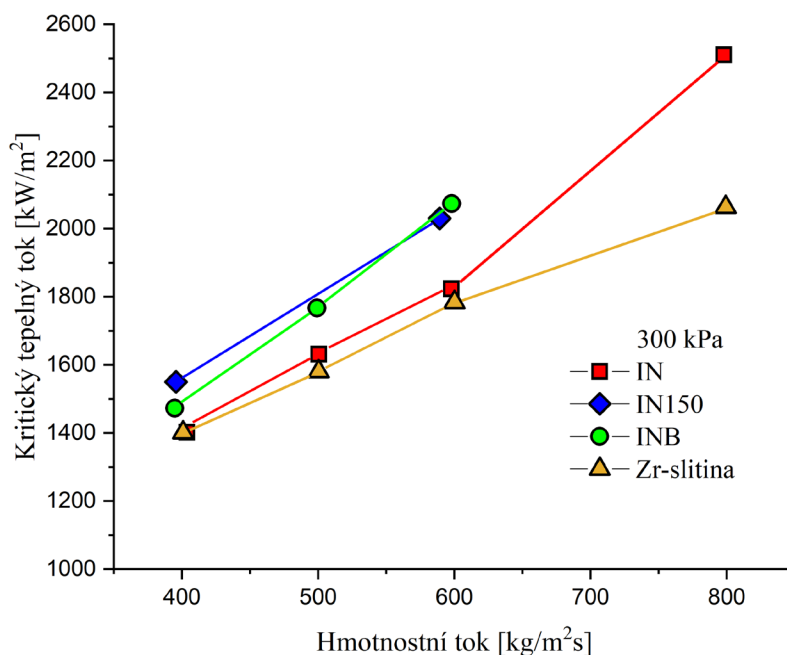


Obr. 30 Porovnání KTT všech testovaných vzorků při tlaku na výstupu z testovací sekce 200 kPa .

Při hmotnostním toku $500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ bylo naměřeno největší zvýšení KTT oproti hladkému povrchu. Tohoto zvýšení dosáhl obroušený povrch IN150 hodnotou

18,12 % při 200 kPa , patrné také na Obr. 30. Hodnoty při 500 kg/m²s byly naměřeny pouze jednou, proto hodnota zvýšení KTT nepodléhá stejným podmínkám jako hodnoty při 400 a 600 kg/m²s.

Nejvyššího procentuálního nárůstu KTT při 600 kg/m²s dosáhl balotinovaný povrch Inconelu™ 625 při tlaku 300 kPa.. Balotinovaný povrch vykazoval zvýšení KTT o 14,9 %, na obroušeném povrchu bylo naměřeno zvýšení KTT pouze o 10,14 %.



Obr. 31 Porovnání KTT všech testovaných vzorků při tlaku na výstupu z testovací sekce 300 kPa.

Modifikované povrchy vykazovaly shodné trendy KTT jako technicky hladká Inconel.

Obroušený povrch vykazoval obecně vyšší zvýšení KTT v oblasti nižších průtoků, viz Obr. 29, na balotinovaném povrchu byly naměřeny vyšší KTT v oblasti 600 kg/m²s při tlaku 120 a 300 kPa.

Obecně nižší vliv upraveného povrchu v oblastech nižších tlaků a hmotnostních toků lze připisovat většímu objemovému podílu páry, který omezuje přístup kapaliny k vyhřívanému povrchu a omezuje interakci povrchu s kapalinou. V oblastech vyšších tlaků a hmotnostních toků je objemový poměr páry příznivější a je zde pozorován vyšší vliv povrchu na KTT.

6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zkoumání kritického tepelného toku na hladkých a upravených površích za podmínek konvektivního varu vody v mezikruhovém vnitřně vytápěném vertikálním kanále za nízkých tlaků. Nové experimentální zařízení bylo v rámci této práce navrženo, zkonstruováno, vybaveno řídicím softwarem a uvedeno do provozu. Zařízení umožňuje proměřit charakteristiky KTT při konvektivním varu

na demineralizované vodě od 100 kPa do 1500 kPa. Toto zařízení je schopno kontinuálně operovat s teplotou vstupní vody od 45 °C do 198,3 °C a s průtoky od 0,026 kg/s do 0,66 kg/s. Maximální výkon disipovaný v testovací sekci přímým průchodem DC proudu dosahuje 100 kW s napětovým omezením 100 V a maximálním proudovým omezením 1500 A (krátkodobě 1700 A). Testovací sekce použitá pro experimenty obsažené v této práci se skládala z trubice z křemenného skla s vnitřním průměrem 14,8 mm a vytápěnou trubkou o vnějším průměru 9,14 mm s vytápěnou délkou 365 / 380 mm. Najíždění zařízení a první experimenty probíhali na trubce z Inconelu™ 625 pro jeho vysokou tepelnou odolnost. Po sérii experimentů bylo přikročeno k experimentům na zirkoniové trubce. Zirkoniová trubka byla použita pro přímé porovnání experimentů na Inconelu s materiálem používaným v jaderných reaktorech. V průběhu experimentů na zirkoniu bylo nutné navrhnout novou sondu měření vnitřní teploty vytápěného povrchu, při použití řešení, které bylo funkční na Inconelu, došlo k protavení zirkoniového vzorku.

Výskyt KTT byl pozorován v oblasti celé horní poloviny vytápěného povrchu. Při vzniku KTT dochází k formaci malé horké oblasti, která bývá jasně ohraničena. Toto ohraničení zvyšuje náročnost na včasnou detekci. Horká oblast jeví značnou neochotu k azimutálnímu pohybu, roste vertikálně ve směru proudění média, dokud není detekována termočlánkem v další řadě. Pokud dojde ke KTT uprostřed vytápěného povrchu je vysoké riziko termického poškození vytápěného povrchu a ohnutí vzorku. Tento jev byl častou příčinou ukončení experimentů na zkoumaném vzorku. Počet výskytů KTT s přehřátím povrchu se rapidně snížil použitím sondy se 14 termočlánky v horní polovině vytápěného povrchu (4. verze sondy).

Hladký Inconelový a zirkoniový vzorek byly zkoumány v oblasti hmotnostních toků 400, 500, 600 a 800 kg/m²s na třech tlakových úrovních 120 kPa 200 kPa a 300 kPa s konstantním vstupním podchlazením Δh_{in} 170 až 180 kJ/kg. Byl zaznamenán prakticky lineární růst KTT v závislosti na hmotnostním toku v oblasti od 400 do 600 kg/m²s. Jasný růst KTT s tlakem byl zaznamenán v oblasti 200 kPa až 300 kPa, vliv tlaku v oblasti 120 kPa až 200 kPa nebyl pro hladké povrchy zřejmý. V průběhu experimentů byl po 19 hodinách varného času pozorován pozitivní vliv oxidické vrstvy na KTT na hladkém Inconelovém vzorku.

Výsledná naměřená data byla porovnána s literaturou. Provozní parametry byly nastaveny, aby co nejlépe odpovídali experimentům prováděných Haasem[1] Výsledné porovnání potvrdilo velice dobrou shodu naměřených dat s daty uvedenými v [1].

Povrch Inconelové trubky byl upraven dvěma mechanickými způsoby bez přídavného materiálu. Tato varianta byla zvolena pro případnou jednoduchou aplikovatelnost na zirkoniovou trubku. Prvním způsobem bylo obroušení brusným plátnem zrnitosti 150 zrn/cm², druhým způsobem bylo otryskání skleněnými kuličkami tzv. balotinování.

Obě úpravy povrchu vykazovali vyšší hodnoty KTT. V oblasti nízkých tlaků a nízkých hmotnostních toků byl vliv úprav v rámci maximální odchylky měření KTT. V oblasti hmotnostních toků 500 kg/m²s vykazoval vyšší hodnoty KTT broušený

povrch, při tlaku 200 kPa došlo ke zvýšení KTT o 18,2 %. Ovšem toto měření bylo provedeno pouze jednou. V Oblasti 600 kg/m²s bylo dosaženo vyšších hodnot na balotinovaném povrchu. Ten dosahoval zvýšení KTT oproti hladkému povrchu o 14,9 %.

Na všech vzorcích byla provedena analýza povrchu laserovým mikroskopem a analýza smáčivosti metodou sedící kapky. Bylo zjištěno zvýšení hrubosti balotinovaného povrchu o 60 % v následku varu. Bylo zjištěno zvýšení smáčivosti hladkého povrchu o 74 % po 25 hodinách a 23 minutách varu. Všechny tyto parametry měly pozitivní vliv na KTT.

Experimenty obsažené v této práci ověřili funkčnost zařízení. V budoucí fázi experimentů bude probíhat výzkum vlivu jednotlivých parametrů za vyšších tlaků, které smyčka umožňuje. V době dokončování této práce byly připraveny 4 vzorky ATF (accident-tolerant fuel) materiálů každý v délce 400mm k dalšímu výzkumu vlivu povrchu na KTT.

7. BIBLIOGRAFIE

- [1] HAAS, Christoph. Critical Heat Flux for Flow Boiling of Water at Low Pressure on Smooth and Micro-Structured Zircaloy Tube Surfaces KIT Scientific Reports ; 7627. Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing, 2012. ISBN 978-386-6449-237.
- [2] NUKIYAMA, Shiro, 1984. The maximum and minimum values of the heat q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. International Journal of Heat and Mass Transfer [online]. roč. 27, č. 7, s. 959–970. ISSN 00179310.
- [3] INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. 5th ed. New York: J. Wiley, c2002, xix, 981 s. ISBN 04-713-8650-2
- [4] KWARK, Sang M., Gilberto MORENO, Ratan KUMAR, Hyejin MOON a Seung M. YOU, 2010. Nanocoating characterization in pool boiling heat transfer of pure water. International Journal of Heat and Mass Transfer [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 53, č. 21-22, s. 4579–4587. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.035
- [5] ROGERS, J T, M SALCUDEAN a A E TAHIR, 1982. Flow Boiling Critical Heat Fluxes for Water in a Vertical Annulus at Low Pressure and Velocities. Proceedings of The Seventh International Heat Transfer Conference. s. 339–344.
- [6] EL-GENK, Mohamed S., Stanley J. HAYNES a Kim SUNG-HO, 1988. Experimental studies of critical heat flux for low flow of water in vertical annuli at near atmospheric pressure. International Journal of Heat and Mass Transfer. roč. 31, č. 11, s. 2291–2304. ISSN 00179310.
- [7] CHUN, Se-Young, Heung-June CHUNG, Sang-Ki MOON, Sun-Kyu YANG, Moon-Ki CHUNG, Thomas SCHOESSE a Masanori ARITOMI, 2001. Effect of pressure on critical heat flux in uniformly heated vertical annulus under low flow conditions. Nuclear Engineering and Design. roč. 203, č. 2-3, s. 159–174. ISSN 00295493.
- [8] MISHIMA, Kaichiro, Hiedeaki NISHIHARA a Itaru MICHİYOSHI, 1985. Boiling burnout and flow instabilities for water flowing in a round tube under atmospheric pressure. 1985. Dostupné z: doi:10.1016/0017-9310(85)90120-6

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní informace

Jméno: Ing. Ladislav Suk
Datum narození: 23. 2. 1988
Národnost: Česká
Adresa: Bory 171,594 61 Bory
Telefon: +420 776 744 826
E-mail: Ladislav.Suk@vut.cz

Zaměstnání a praxe

2017 – **Technik měření, ORGREZ a.s.**

Vzdělání

2012 – **Vysoké učení technické v Brně**, fakulta strojního inženýrství, obor Konstrukční a procesní inženýrství, doktorské studium
2010–2012 **Vysoké učení technické v Brně**, fakulta strojního inženýrství, obor Energetické inženýrství, navazující magisterské studium, zakončeno státní zkouškou, obdržen titul inženýr
2007–2010 **Vysoké učení technické v Brně**, fakulta strojního inženýrství, obor Strojní inženýrství, zakončeno státní zkouškou, obdržen titul bakalář
2003–2007 **Střední škola technická Žďár nad Sázavou** Obor mechanik seřizovač, zakončeno maturitní zkouškou

Dovednosti a znalosti

Jazyky: Angličtina: středně pokročilý
Němčina: začátečník
IT: LabVIEW, CAD systémy, ANSYS,
Řidičský průkaz: Skupina B
Zájmy: Film, Robotika

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou kritických tepelných toků (KTT) na technicky hladkých a upravených površích při nízkých tlacích. Teoretická část uvádí základní pojmy dvoufázového proudění a rozbor dosavadních prací o vlivu povrchu na KTT.

V hlavní části práce je popsáno vybudované experimentální zařízení pro výzkum KTT při nízkých tlacích 100 -1500 kPa (1-15 bara) s vertikální mezikruhovou testovací sekcí. Mezikružší je tvořeno venkovní skleněnou trubicí s vnitřním průměrem 14,8mm a vnitřní trubicí z Inconelu™ 625 / Zr-slitiny o vnějším průměru 9,14mm a vytápěnou délkou 380/365 mm.

Experimentální část se zabývá přesností měření, metodikou testování a interpretací výsledků. Experimenty KTT na hladkém povrchu byly provedeny na tlakových hladinách 120 kPa, 200 kPa a 300 kPa, při vstupní teplotě 64 °C, 78 °C, 91 °C a při hmotnostních tocích 400, 500, 600 a 800 kg/m²s. Experimenty na povrchu upraveném broušením (brusným plátnem hrubosti 150 zrn/cm²) a balotínováním, byly provedeny při hmotnostních tocích 400, 500 a 600 kg/m²s. Celkově 122 experimentů bylo porovnáno s literaturou. Maximální zvýšení KTT na broušeném / balotínovaném povrchu bylo 18,12 % / 16,17 %. Struktura povrchu byla analyzována laserovým mikroskopem. Smáčivost povrchů byla měřena metodou sedící kapky. Prvkové složení povrchu bylo vyhodnoceno pomocí metody EDS.

ABSTRACT

This thesis deals with the problem of critical heat flux (CHF) on technically smooth and treated surfaces at low pressures. The theoretical part presents the basic concepts of two-phase flow and an analysis of existing work on the influence of the surface on CHF.

The main part of the work describes the built experimental apparatus for CHF research at low pressures of 100 -1500 kPa (1-15 bar abs.) with a vertical internally heated annular test section. The internal annuli consists of an outer glass tube with an inner diameter of 14.8 mm and an inner tube made of Inconel™ 625 / Zirconium alloy with an outer diameter of 9.14 mm and a heated length of 380/365 mm.

CHF experiments on technically smooth surface were performed at outlet pressures 120 kPa, 200 kPa and 300 kPa, at an inlet temperature of 64 °C, 78 °C and 91 °C and at mass flux of 400, 500, 600 and 800 kg / m²s. The Inconel tubes were tested in two different surface modifications - abraded and bead blasted. Experiments were performed at mass flows of 400, 500 and 600 kg / m²s. The total number of 122 experimental runs were conducted and the results were compared with other literature experimental data. The maximum increase of CHF on abraded / bead blasted tube was 18.12 % / 16.17 %. The surface structure was analysed by laser microscopy. The wetting behaviour of the surface structures was measured by the sessile drop method. The elemental analysis of the surface was evaluated using the EDS method.