

Obrazová analýza rovinného řezu pěnou

Bc. Marek Galetka

Diplomová práce
2010

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek GALETKA**

Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství**

Téma práce: **Obrazová analýza rovinného řezu pěnou**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracovat literární rešerši na dané téma.
2. Výběr vhodných materiálů.
3. Zhotovení obrazů rovinných řezů pěnou.
4. Obrazová analýza.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. J. C. Russ and J. C. Russ: **Introduction to Image Processing and Analysis, 2007.**
2. L. O’Gorman, M. J. Sammon and M. Seul: **Practical Algorithms for Image Analysis, 2008.**

Vedoucí diplomové práce:

doc. RNDr. Petr Ponížil, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

15. února 2010

Termín odevzdání diplomové práce:

19. května 2010

Ve Zlíně dne 15. února 2010

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá odhadem velikosti pórů v otevřených pěnách z rovinného řezu pěnou. Byla testována nová metoda zpracování obrazu, předpokládající, že středy pórů se nachází v lokálních maximech Euklidovské vzdálenosti. Použili jsme aproximaci struktury měkké polyuretanové pěny pomocí Voronoiovy teselace a docílili jsme rozdělení rovinných řezů pěnou na jednotlivé póry. V práci jsou navrženy procesy zobecnění rovinných metod na prostorové. Vzorčky polyuretanových pěn s různou pórovitostí byly podrobeny obrazové analýze a zjištěny distribuce velikosti pórů. V závěru byly měřeny akustické vlastnosti zkoumaných materiálů.

Klíčová slova: Obrazová analýza, matematická morfologie, stereologie, teselace, polyuretanová pěna, akustické vlastnosti.

ABSTRACT

This Master thesis is focused on pore size estimation in open pore foams. The pore centers are found as local maxima of Euclidean distance map. The approximation structure of flexible polyurethane foam by Voronoi tessellation is applied and distribution of areas of pore planar section is obtained. There are suggested processes for generalization of planar methods to spatial ones. Samples of polyurethane foams with different porosities were analyzed by image analysis and pore sizes distribution were estimated. Finally the acoustic properties was studied.

Keywords: Image analysis, mathematical morphology, stereology, tessellations, polyurethane foam, acoustic properties.

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. RNDr. Petru Ponižilovi, Ph.D. za zájem, připomínky a čas, který věnoval mé práci. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomáši Matouškovi za spolupráci při tvorbě vzorků a řešení výsledků.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 19.května 2010

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

OBSAH

OBSAH	8
ÚVOD	10
I. TEORETICKÁ ČÁST	11
1 OBRAZOVÁ ANALÝZA	12
1.1 METODY OBRAZOVÉ ANALÝZY.....	13
1.1.1 MĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY OBJEKTŮ.....	14
1.2 MATEMATICKÁ MORFOLOGIE.....	15
1.2.1 MORFOLOGICKÉ OPERACE.....	16
1.3 STEREOLOGIE.....	17
1.3.1 STEREOLOGICKÉ ROVNICE.....	18
1.4 TESELACE.....	19
1.4.1 VORONOIOVY TESELACE.....	20
1.4.1.1 Poissonova-Voronoiova teselace.....	21
1.4.1.2 Teselace generovaná Booksteinovým modelem.....	22
1.4.1.3 Teselace generované shlukovými poli.....	22
1.4.1.4 Praktické využití Voronoiových tescalcí.....	23
2 POLYMERNÍ PĚNY	24
2.1 POLYURETANY.....	25
2.1.1 POLYURETANOVÉ PĚNY.....	27
3 AKUSTIKA	28
3.1 ZVUK A JEHO CHARAKTERISTIKA.....	28
3.2 ZÁKLADNÍ VELIČINY V AKUSTICE.....	28
3.3 POHLCOVÁNÍ ZVUKU.....	29
3.3.1 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	29
3.3.2 MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	31
3.4 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI PÓROVITÝCH MATERIÁLŮ.....	32
II. PRAKTICKÁ ČÁST	33
4 ODHAD VELIKOSTI PÓRŮ	34
4.1 OTISK A SKENOVÁNÍ PĚN.....	34
4.2 OBRAZOVÁ ANALÝZA.....	35

4.2.1	EUKLIDOVSKÁ DISTANČNÍ MAPA (EDM).....	35
4.2.2	VORONIOVA TESELACE	37
4.2.3	PROSTOROVÉ ZOBECNĚNÍ	37
4.3	VZORKY MATERIÁLŮ	38
4.4	URČENÍ KONSTANTNÍ DEFORMACE	40
4.5	DISTRIBUCE VELIKOSTI PÓRŮ.....	42
4.6	OBJEMY PÓRŮ	46
5	AKUSTICKÉ VLASTNOSTI	48
5.1	MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	48
5.1.1	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	48
5.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	50
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	57
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK	62
	SEZNAM GRAFŮ.....	63
	SEZNAM PŘÍLOH	64

ÚVOD

Na fyzikálních vlastnostech polymerních pěn má velký vliv její struktura. Jedná se o velikost, respektive objem pórů a distribuce velikosti pórů. Jsou známy různé postupy ke zjištění distribuce velikosti pórů, ale finanční náklady na přístrojové vybavení je vysoké.

V diplomové práci se bude stanovovat distribuce velikosti pórů v polymerních pěnách s otevřenými póry jednoduchou a levnou metodou otisku povrchu řezu. Bude zpracováno pět vzorků polyuretanových pěn s různou pórovitostí. Následnou digitalizací se otisk podrobí obrazové analýze. Hlavním cílem bude vypočtení průměrné hodnoty objemu pórů vzorků pěn. Obrazy zpracované v teselačním programu nebudou obsahovat informace o objemu pórů, proto se budou experimentálně naměřená data generovat s teoretickými hodnotami při hledání nejpravděpodobnějšího poloměru póru. Metoda bude porovnána i s obrázky rovinných řezů z počítačové tomografie.

V další části této práce budou měřeny akustické vlastnosti těchto materiálů. Z akustických veličin bude měřen činitel zvukové pohltivosti a činitel zvukové odrazivosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBRAZOVÁ ANALÝZA

Obrazová analýza se zabývá získáváním kvantitativních informací o různých geometrických parametrech mikro- i makrostruktury materiálů (např. údajů o počtu, ploše resp. velikostních parametrech částic, o jejich celkovém plošném podílu v matici aj.). Těchto informací lze použít jednak přímo pro hodnocení struktury materiálu, jednak jako podkladu pro stereologickou analýzu. Kvantitativní hodnocení charakteristických parametrů zkoumané struktury případně vypracování stereologického modelu a matematicko-statistická analýza dosažených výsledků je důležitou součástí posuzování vztahů mezi strukturou a vlastnostmi či mezi mírou změn struktury a vnějšími faktory [1].

Podstatou obrazové analýzy je digitalizace obrazu a zpracování vzniklého souboru v počítači. Nejprve se musí obraz zaznamenat (digitálním fotoaparátem, kamerou), převést obrazový signál na digitální data a nakonec zpracovat pomocí programového vybavení určeného k obrazové analýze. Obraz je možné hodnotit jako celek nebo jen vybrané části. Nepracuje se přitom s jednotlivými pixely, ale s celým obrázkem najednou. Využívá se přitom lineárních (integrálních) transformací dat, kterým se přiřazují pomocí definované báze jiná data (tzv. spektrum). V těchto spektrech jednotlivé pixely zvýrazňují různé vlastnosti (definované bázi) celého původního obrazu [2].

K záznamu obrazů se používají výhradně zařízení obsahující CCD prvek (např. soustava mikroskop – digitální fotoaparát). V současné době lze pořídit tato zařízení s dostatečnou plošnou rozlišovací schopností (určenou počtem pixelů obrazového senzoru) a barevnou hloubkou (určenou počtem kvantovacích kroků převodníku analogového signálu vygenerovaného světlem na digitální data). Na druhé straně mohou vzniknout v průběhu záznamu a převodu obrazu na digitální data chyby, které je nutno odstranit (např. nehomogenitu osvětlení obrazu, nelineární přenos jasů – tzv. gamma korekce a teplotní šum) [3].

Nejběžnějším a jednoduchým zařízením pro sběr digitálních fotografií z mikroskopů jsou videokamery. Pro vědecké aplikace se používají monochromatické kamery, které jsou levnější než barevné fotoaparáty a poskytují vyšší rozlišení, kontrast a citlivost. Skenery napodobují kopírky: objekt na rovném povrchu, jako je například mikroskopický preparát, barevná nebo jednobarevná fotografie jsou umístěny na skleněnou desku a pomocí zařízení, obsahující CCD prvek se vytvoří digitální soubor. Skenování je velmi užitečný a poměrně levný způsob snímání obrazu [4].

Obrazová analýza spoléhá do značné míry na výpočetní techniku. V současnosti se v návaznosti na rychlý vývoj softwarových a hardwarových prostředků i laboratorní přístrojové techniky intenzivně rozvíjí metody obrazové analýzy. Nikde jinde nebylo dosaženo tak rychlého pokroku jako v oblasti digitální analýzy obrazu. Rozšíření počítačové kapacity, nový a lepší software, nástup stolních počítačů, to vše přispělo k dosažení tohoto pokroku [1], [4].

Digitální zpracování obrazu pokrývá široké spektrum aplikací v lékařství, fyzice, astronomii, biologii a téměř všech aplikací s obrazy. Kromě toho si digitální zpracování našlo cestu do domácností s mnoha výrobci fotoaparátů, jejichž výrobky jsou cenově dostupné [5].

1.1 Metody obrazové analýzy

Obecné metody používané v obrazové analýze jsou obvykle rozděleny do různých, po sobě následujících kroků [6]:

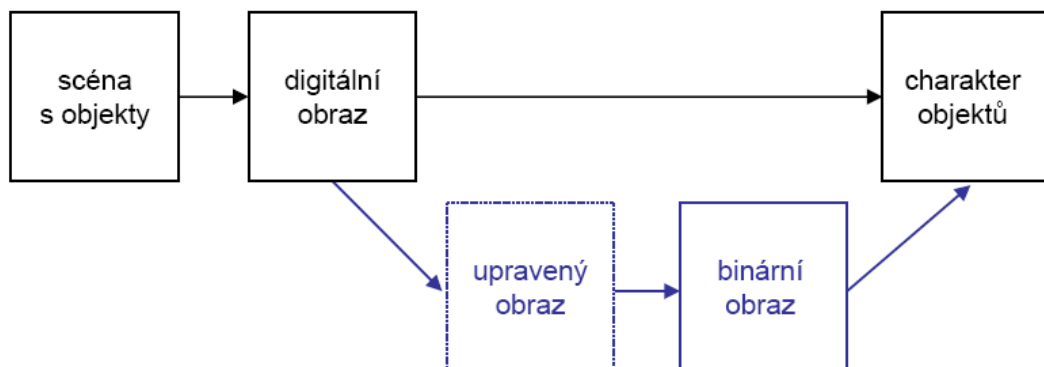
Prvním krokem v procesu obrazové analýzy je snímání vzorků a uložení obrazu v číselné formě do počítače. Při snímání dochází k digitalizaci obrazu. Digitalizace je v obrazové technice převod spojitě dvojrozměrné obrazové informace do dvojrozměrné obrazové matice. Digitalizace se skládá ze vzorkování (diskretizace v ploše) a následné kvantizace (diskretizace v úrovních) [7], [8].

Druhým krokem je předzpracování obrazu. Vzniklé snímky se před zpracováním upravují proto, aby zlepšily původní verzi obrazu, který usnadňuje následné kroky analýzy. Vstupem i výstupem je diskrétní (digitální) obraz. Cílem předzpracování obrazu je potlačit šum a zkreslení vzniklé při digitalizaci a přenosu [6], [7].

Segmentace je třetím krokem. Umožňuje nalézt v obrazu části objektů, se kterými se pracuje a odstraní ty části, které z hlediska dalšího zpracování nejsou zajímavé. Tento krok je obvykle považován za nejdůležitější operaci při digitálním zpracování obrazových dat, protože následné měření je velmi závislé na přesnosti tohoto kroku. Základní metodou segmentace je prahování. Prahování je založeno na konstantní odrazivosti či pohltivosti objektů a tyto objekty se poté oddělí od pozadí. Výsledkem je binární obraz jako pole dat obsahující pouze nulu nebo jedničku. Element tohoto pole se nazývá pixel. Objekty jsou tvořeny spojením pixelů jednoho typu (černé) a pozadí tvoří množina doplňků (bílé). Pro definici spoje-

ní pixelů se obvykle používá technika nejbližších sousedů, tj. připouští se spojení přes strany i hrany (rohy). Nejmenší strukturní element obsahuje devět pixelů (3 řádky a 3 sloupce kolem centrálního pixelu) [6], [7], [9].

Popis nalezených objektů je čtvrtým krokem zpracování obrazu. Objekty lze popsat kvantitativně pomocí číselných hodnot nastavených parametrů. Posledním krokem zpracování obrazové analýzy spočívá v popisu mikrostruktury pomocí parametrů nebo funkcí (vektorů) získaných ze zpracovaného obrazu a nakonec interpretace získaných dat [7], [10].



Obr. 1: Schéma obrazové analýzy [11]

1.1.1 Měření charakteristik objektů

Obyčejně se používá individuálních charakteristik (popisujících jednotlivé objekty) a texturálních charakteristik (charakterizujících strukturu celého obrazu). Základní charakteristické rysy jsou [9]:

- Plocha A (individuální i texturní), která je definována jako počet pixelů objektu nebo fáze.
- Plocha celková M_A (texturní) je rovna velikosti pole obrazu.
- Relativní plocha F_r (texturní) je definována jako:

$$F_r = \frac{A}{M_A}. \quad (1)$$

- Ekvivalentní průměr D (individuální) je definován vztahem:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}. \quad (2)$$

- Průměrná projekce P_D (individuální a texturní) je průměr projekcí do směrů 0° , 45° , 90° , 135° .

- Obvod O (individuální a texturní) je definován jako:

$$O = \pi \cdot P_D. \quad (3)$$

- Povrchová hustota S_D (texturní) je definována jako:

$$S_D = \frac{4 \cdot M_A}{\pi \cdot O}. \quad (4)$$

- Kruhovitost C (cirkularita) je definována jako:

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{O^2}. \quad (5)$$

- Délka L pro tyčkový objekt (individuální a texturní) je definována výrazem:

$$L = \frac{O + \sqrt{O^2 - 16 \cdot A}}{4}. \quad (6)$$

Velký vliv na analýzu obrazu má teorie matematické morfologie, kterou založili Matheron a Serra. Je populární v oblasti zpracování obrazu hlavně pro své matematické základy a je využívána téměř ve všech aplikačních oblastech, které se zabývají digitálním zpracováním obrazu [12].

1.2 Matematická morfologie

Matematická morfologie (MM) je teorie metod pro analýzu a zpracování geometrických struktur. Je složena z širokých teoretických pojmů, nelineárních operátorů a algoritmů, zaměřené na získávání geometrických objektů z obrazu, které dávají informace o jejich tvaru a velikosti. Je založena na teorii množin (množiny v MM představují objekty v obraze) a stochastické integrální geometrii. Původně se používala k analýze snímků geologických a biologických vzorků. Dnes MM nabízí mnoho teoretických a algoritmických nástrojů a inspiruje nové směry v oblastech výzkumu v oblasti zpracování obrazu, zpracování signálu, počítačového vidění a rozpoznávání obrazu [13], [14].

Matematická morfologie poskytuje řadu nástrojů k provádění jednoduchých, až po ty nejnáročnější úkoly: redukce šumu, detekce hran, segmentace, tvar analýzy atd. [12].

Metody matematické morfologie jsou vhodné pro studium prostorového rozložení objektů v obraze, pro analýzu systémů skládajících se z malých, pravidelných objektů [15].

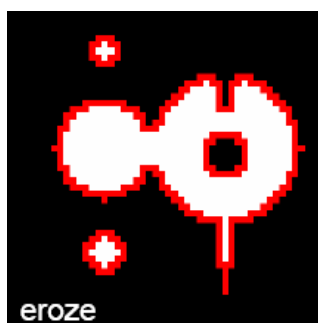
1.2.1 Morfologické operace

- Eroze (odstranění vybraných pixelů z povrchu objektů)

Objekty se po provedení eroze zmenší, neboť ubere z jejich okrajů. Je-li objekt nebo úzký výběžek menší, než ubíraná šířka, zmizí z obrazu.

- Dilatace (přidání vybraných pixelů na povrch objektů)

Po dilataci jsou objekty zvětšeny, což znamená, že k objektu je přidána „slupka“. Je-li vzdálenost mezi dvěma objekty menší, než dvojnásobná tloušťka „slupky“, objekty se spojí. Je-li otvor v objektu menší, než dvojnásobná tloušťka „slupky“, zmizí z obrazu.



Obr. 2: Eroze [11]



Obr. 3: Originál [11]



Obr. 4: Dilatace [11]

- Otevření

Je to eroze následovaná dilatací, takže velikost objektů se nijak významně nemění. Otevření vyhlazuje kontury, maže malé objekty a rozpojuje částice spojené tenkou šíjí.

- Zavření

Je to dilatace následovaná erozí, takže velikost objektů není podstatně změněna. Vyhladí obrysy, zaplní malé díry a vyhladí obrys tím, že zaplní malé okrajové trhliny. Též může spojit blízké objekty.



Obr. 5: Otevření [11]



Obr. 6: Zavření [11]

- Vyčištění

Nejprve eroduje obraz, takže malé objekty mizí, pak jsou zbývající objekty rekonstruovány do jejich původní velikosti a tvaru. Výhoda tohoto postupu spočívá v tom, že malé objekty zmizí, ale zbytek obrazu zůstane nedotčen.

- Vyplnění děr

Plní díry uvnitř obrazu. Tato operace je užitečná například při detekci hranic objektů, neboť objekty mají bohatou vnitřní strukturu s intenzitami typickými pro pozadí a hranice. Po této operaci jsou díry transformovány na uzavřené oblasti [1], [9], [11].



Obr. 7: Vyčištění [11]



Obr. 8: Vyplnění děr [11]

1.3 Stereologie

Stereologie je matematická disciplína zabývající se odhadem geometrických charakteristik trojrozměrných struktur na základě pozorování sond nižší dimenze (rovin řezu, projekcí).

Používá se v řadě vědních oborů jako je biomedicína, geologie, materiálový výzkum, ke kvantitativnímu hodnocení trojrozměrných struktur. Aplikace statistiky ve stereologii jsou významné například v materiálových vědách. Typickou ukázkou je zkoumání mikroskopických trhlin v kovech, které lze pozorovat pouze pomocí řezu materiálu, takzvaných

profilů. Ve stereologii se rozlišuje klasický a modelový přístup. V prvním z nich je struktura považována za deterministickou a pouze sondy jsou náhodné, v druhém přístupu se již struktura modeluje náhodným procesem [16], [17].

1.3.1 Stereologické rovnice

Na analýzu rovinných řezů lze použít tři základní stereologické rovnice, jež vyjadřují vztah mezi počtem profilů N_A jednotkové plochy roviny řezu vzorku a počtem profilů zachycených jednotkovou délkou přímky N_L tohoto řezu (rovnice 10). Vztah mezi počtem profilů jednotkové plochy vzorku v rovině řezu N_A a počtem pórů v objemové jednotce vzorku N_V (rovnice 8) a vztah mezi počtem profilů zachycených jednotkovou délkou přímky N_L v rovině řezu a počtem pórů v objemové jednotce vzorku N_V (rovnice 9) [18].

Při odhadu počtu pórů v objemové jednotce jsou ze stereologického pohledu důležité následující charakteristiky [19]:

Skutečná struktura pórů (3D teselace)

-střední objem pórů E_V

-střední povrch pórů E_S

-střední šířka pórů (klešťový průměr) E_W

Plošná indukovaná teselace – 2D (řez 3D struktury rovinou)

-střední plocha profilu (řezu póru rovinou) $E_{V'}$

Lineární indukovaná teselace – 1D (řez 3D strukturou přímkou)

-střední délka tětivy (řezu póru přímkou) $E_{V''}$

E_{\bullet} je střední hodnota veličiny \bullet . Veličiny N_V , N_A , N_L jsou reciproké veličiny ve stejném pořadí k veličinám v , v' , v'' . Pomocí $E_{V'}$ a $E_{V''}$, jejichž hodnoty můžeme získat měřením, lze odhadnout objemovou charakteristiku dané struktury E_V . Na základě údajů o délce tětiv a ploše profilů lze odhadnout variační koeficienty ploch $[CV v']_{v'}$ a tětiv $[CV v'']_{v''}$ [18], [19].

Vztahy mezi charakteristikami 3D teselací a indukovaných 2D a 1D teselací jsou dány již zmíněnými stereologickými rovnicemi jež vyjadřují vztahy mezi jednotlivými proměnnými [18], [19]:

$$\mathbf{E}_V = \mathbf{E}_W \cdot \mathbf{E}_V' = \mathbf{E}_S \cdot \mathbf{E}_V' / 4 \quad (7)$$

Podle nich můžeme vypočítat průměrnou hodnotu objemu cel \mathbf{E}_V jednak pomocí znalosti střední plochy \mathbf{E}_V' a střední šířky cel \mathbf{E}_W , jednak ze středního povrchu \mathbf{E}_S a průměrné délky tětv \mathbf{E}_V'' cel. Tyto rovnice lze přepsat za použití reciprokových veličin jako:

$$\mathbf{E}N_{V=c'} (\mathbf{E}N_A)^{3/2} \quad (8)$$

$$\mathbf{E}N_{V=c''} (\mathbf{E}N_L)^3 \quad (9)$$

$$\mathbf{E}N_{A=c} (\mathbf{E}N_L)^2 \quad (10)$$

kde c' , c'' a c jsou pro danou strukturu bezrozměrné konstanty zavedené vztahy:

$$c' = \sqrt{\frac{\mathbf{E}_V}{(\mathbf{E}_W)^3}}, \quad c'' = \frac{(\mathbf{E}_V)^2}{(\mathbf{E}_S/4)^3}, \quad c = \frac{\mathbf{E}_W \mathbf{E}_V}{(\mathbf{E}_S/4)^2} = \left(\frac{c''}{c} \right)^{2/3} \quad (11)$$

Problém odhadu velikosti pórů je vlastně redukován na nalezení vhodných hodnot parametrů c' , c'' a c . Tyto parametry závisí na střední šířce a povrchu pórů, vztažených na jednotkový střední objem, tedy na jejich tvaru a nezávisí na středním objemu pórů. Závisí však na distribuci velikostí pórů [19].

Důležité je také uvést, že stereologické rovnice (8), (9) a (10) normy ve skutečnosti neuvádí, ale tyto rovnice jsou skryty v jejich tabulkách. U různých norem se tyto stereologické rovnice liší různými koeficienty c , c' , c'' . Při užití počítačové databáze (počítačové simulace) se tyto koeficienty určí individuálně pro každou strukturu z hodnot koeficientu c , hodnot variačních koeficientů $CV_{V'}$ nebo $CV_{V''}$ a w - s diagramu z počítačové databáze [18], [19].

1.4 Teselace

V přírodních i společenských vědách existuje mnoho oborů, které řeší problém členění prostoru na oblasti. Ve všech oblastech existuje konečná množina center, jimž je přiřazena jistá část prostoru. Výsledkem je rozdělení prostoru na systém oblastí - buněk či cel, vesměs téměř nebo úplně vyplňujících prostor a majících společné nejvýše své hranice. V tomto druhém případě dělení nazýváme teselací. Nejjednodušší přirozené dělení je založeno na vzdálenostech bodů prostoru od center. Vnitřek buňky je pak vytvořen těmi body prostoru, které mají k danému centru blíže než k centrům jiným; hranice buňky jsou tvořeny body, které jsou stejně vzdáleny od více center [20].

Rozložení center v prostoru se nazve bodovým procesem. Centra mohou být rozmístěna homogenně, tzn. navzájem nezávisle v d -rozměrném prostoru nebo heterogenně, kdy jsou tato centra rozmístěna nepravidelně, nebo tvoří různé shluky, působí na ně různé odpudivé a přitažlivé síly. Pro tato centra platí $BP=\{x_1, \dots, x_n\}$, kde BP je konečná množina bodů v omezené oblasti. Shluk buněk (cel) tvoří teselaci a případ teselace v rovině se nazývá mozaika [18], [21].

V zásadě lze teselace rozdělit na pravidelné a náhodné. Pravidelné teselace představují prostor rozdělený do stejných buněk co se rozměru i tvaru týče. Nejjednodušším případem jsou kubické a čtvercové teselace, které se však v přírodě téměř nevyskytují – malý objem buňky je zde ohraničen velkou plochou. Optimální rozdělení objemu a povrchu představuje koule, proto je přirozené, že většina navržených pravidelných teselací má buňky tvarem se kouli přibližující – klasický je čtrnáctistěn.

V reálných podmínkách se daleko častěji setkáváme s teselacemi náhodnými – jejich buňky jsou co do rozměrů a tvarů velmi variabilní. Mohou vzniknout jednak přímou konstrukcí stěn podle zadaného pravidla – pak mluvíme o teselacích s přímo generovanými stěnami, jejichž představiteli jsou např. Poissonova teselace nebo Delaunayova teselace, ale také z center – generátorů. Typickými teselacemi, které vznikly z generátorů jsou Voronoiovy a z nich odvozené Johnson-Mehlovy teselace [21].

1.4.1 Voronoiovy teselace

Formální definice cely V_i obyčejné Voronoiovy teselace generované konečným či spočetným bodovým systémem $BP=\{x_1, \dots, x_n\}$ d -rozměrného eukleidovského prostoru, $2 \leq n < \infty$, $x_i \neq x_j$, $i \neq j$, $1 \leq i, j \leq n$ je

$$V_i = \{x \in \mathbf{R}^d, \|x - x_i\| \leq \|x - x_j\|, \text{ pro } j \neq i\}, \quad (12)$$

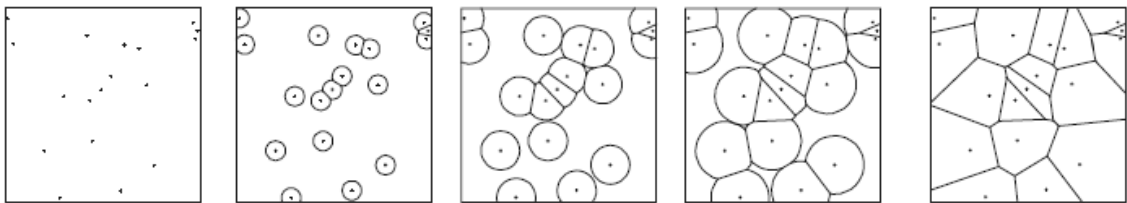
kde $\|x\|$ je eukleidovská norma.

Sjednocení všech cel V_i je obyčejná Voronoiova teselace a BP je množina generátorů. Takto definovaná Voronoiova cela je uzavřená množina a její vnitřek je definován stejnou rovnicí s ostrým znaménkem nerovnosti. Voronoiovu teselaci můžeme vytvořit také následujícím způsobem: označme $E_+^d(x_i, x_j)$ poloprostor ohraničený nadrovinou symetrie

bodů x_i, x_j obsahující bod x_i . Potom průnik všech těchto poloprostorů obsahujících bod x_i je cela Voronoiovy teselace

$$V_i = \bigcap_{j \neq i} E_+^d(x_i, x_j). \quad (13)$$

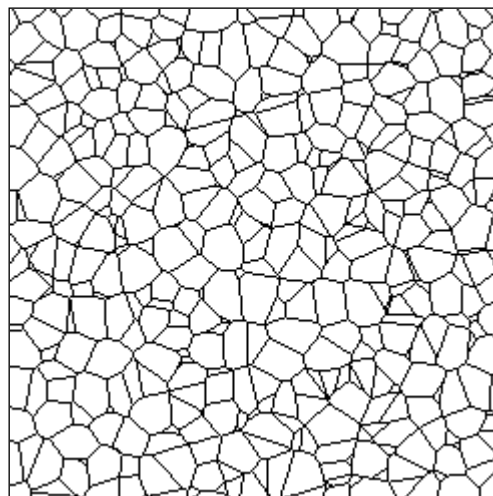
Třetí způsob generace Voronoiovy teselace z daného bodového systému je tzv. růstový model: předpokládejme, že v čase $t = 0$ začnou ze zárodků x_i růst zrna konstantní izotropní rychlostí v . Při tom růst zrna se lokálně zastaví v každém bodě, v němž se sousední zrna dotknou. Takto vzniklá zrna opět vytvoří Voronoiovu teselaci; pokud by rychlost nebyla izotropní je to zobecněná Voronoiova teselace [20].



Obr. 9 Růstový model. Čas t roste zleva doprava. Vlevo $t=0$; vpravo $t=\infty$ [20]

1.4.1.1 Poissonova-Voronoiova teselace

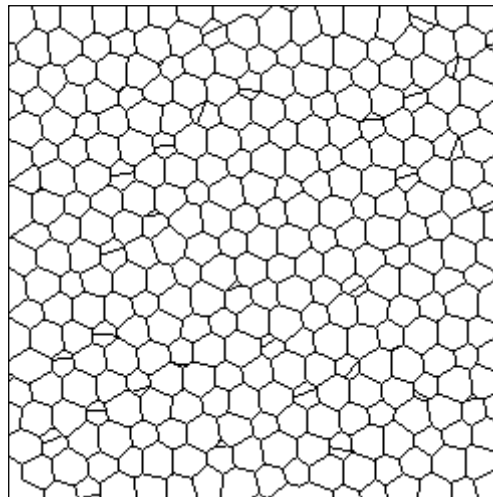
Vlastnosti Poisson-Voronoiovy teselace jsou standardem pro každou klasifikaci, hypotéza „analyzované teselace PVT“ je nulovou hypotézou každého statistického souboru. Mnohé vlastnosti PVT jsou nám známy, buď na základě teoretických odvození, nebo z rozsáhlých počítačových simulací. Generujícím bodovým procesem PVT je stacionární Poissonův bodový proces. Generující body jsou nezávisle náhodně rozmístěny v prostoru [22].



Obr. 10 Poissonova-Voronoiova teselace [23]

1.4.1.2 Teselace generovaná Booksteinovým modelem

Generující bodový proces je pravidelná mřížka, na jejíž každý bod bylo aplikováno náhodné posunutí v náhodném směru. Je-li posunutí nulové, je bodový proces pravidelnou mřížkou a teselace regulární. Jsou-li posunutí velká ve srovnání s meziodovou vzdáleností, jsou body rozmístěny téměř náhodně a teselace se blíží PVT. Mřížky mohou být kubické, prosté, prostorově a plošně centrované. Bodový proces generuje teselace s buňkami tvaru šestistěnu, dvanáctistěnu a dvacetistěnu. Bodový proces může být i hexagonální mřížka, která generuje pravidelný šestiboký hranolek, s parametrem q – poměr výšky hranolu ke stěně podstavy. Změnou parametru q můžeme generovat teselace tvořené tenkými šestiúhelníkovými deskami ($q \ll 1$) až po dlouhé šestiúhelníkové tyče ($q \gg 1$) [22].



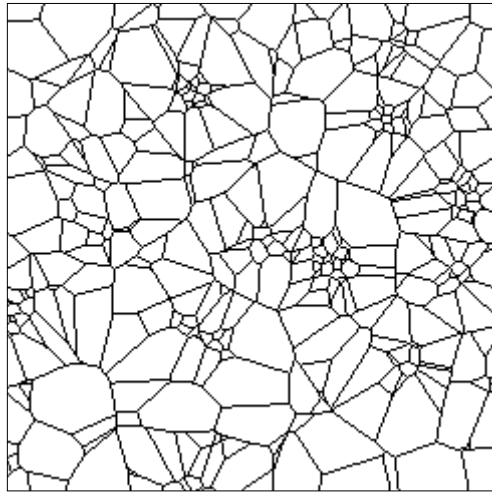
Obr. 11 Booksteinův model [23]

1.4.1.3 Teselace generované shlukovými poli

Generující bodový proces je shlukový proces. Do každého bodu Poissonova bodového procesu je vložen globulární shluk (koule, obsahující uvnitř n náhodně rozmístěných bodů) nebo sférický shluk (n bodů náhodně rozmístěno na povrchu koule).

Tyto teselace představují velmi širokou třídu dělení prostoru. V první řadě závisí na volbě bodového procesu rodičů, kterým může být i mřížka, porušená mřížka, Booksteinův model nebo nějaký shlukový proces. Další stupně volnosti představuje prostorové rozmístění bodů shluku, které může do jisté míry imitovat rodičovský proces, jako je tomu u poissonovských globulárních shluků nebo u pravidelných shluků v mřížkách. Sférické shluky

kombinující poissonovské rozmístění rodičů v \mathbf{R}^d s poissonovským rozmístěním dcer uvnitř sféry dimenze $d-1$ atd. [22], [23].



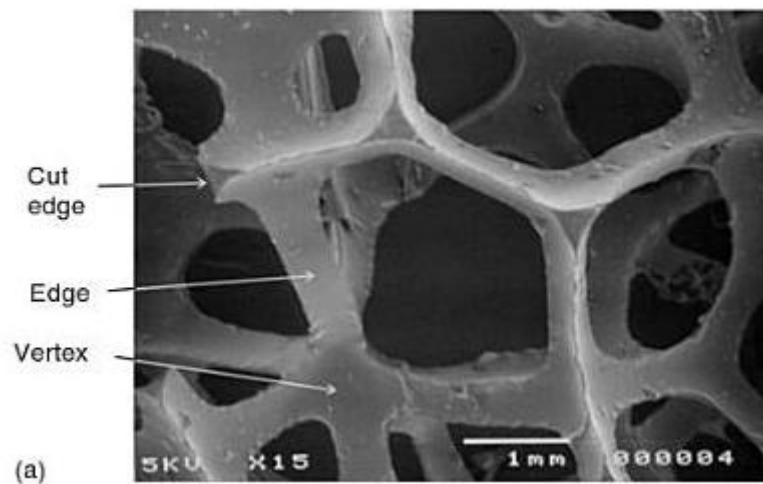
*Obr. 12 Teselace generované
shlukovými poli [23]*

1.4.1.4 Praktické využití Voronoiových tesimalcí

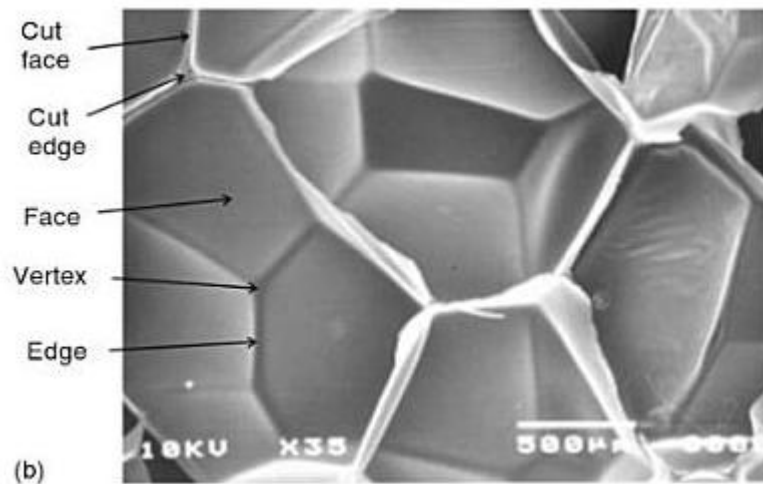
Aplikaci Voronoiových tesimalcí můžeme nalézt v mnoha oborech. S tesimalcemi se nejčastěji můžeme setkat v kosmologii při studiu prostorového rozložení galaxií a v astrofyzice při sledování distribuce hmotností při kondenzaci oblaků mezihvězdného plynu, při optimalizaci rozložení center správy a obsluhy v oblastech (města, okresy, státy), při zjišťování organizace výživy živočišných a rostlinných tkání, při rozpoznávání a ovlivňování mikrostruktury v živé a neživé přírodě, při studiu rozložení živočišných revírů, sídlišť a ekologických nik. Ve fyzice je možné setkat se s Voronoiovými tesimalcemi při výzkumu struktury kapalin, krystalků v polykrystalických materiálech atd. [23].

2 POLYMERNÍ PĚNY

Pěny jsou dnes používané v celé řadě aplikačních oblastí, včetně tepelných výměníků, filtrů, izolátorů nebo jako tlumiče hluku. Mohou obsahovat dvě dominantní formy pórů, a to buď póry otevřené, nebo uzavřené. To má základní vliv na konečné vlastnosti a použití polymeru. Typická mikrostruktura otevřených a uzavřených pórů polymerní pěny je vidět na snímku z elektronového mikroskopu (Obr. 13.) a (Obr.14) [24], [25], [26].



Obr. 13 PUR pěna s otevřenými póry [26]



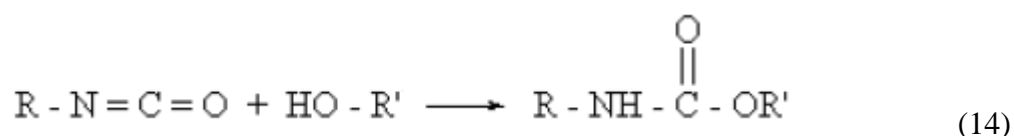
Obr. 14 LDPE pěna s uzavřenými póry [26]

Makroskopické vlastnosti pěny např. tepelná vodivost, propustnost, pružnost nebo absorpce zvuku jsou velmi ovlivněny mikrostrukturou. Otevřené póry mají vyšší absorpční schopnost pro vlhkost, větší propustnost plynů a par, nižší izolační schopnost tepla, ale vyšší schopnost pohlcovat a tlumit zvuk [24], [25].

Pěny s otevřenými nebo uzavřenými póry se používají v obalovém průmyslu, ve stavebnictví, automobilovém průmyslu, a ostatních průmyslových odvětvích. Typickými polymerními pěny jsou PE, PP, PS, PVC, EVA a PPO-PS směsi. Všechny tyto pěny mají uzavřené póry. Typickou pěnou s otevřenými póry jsou PUR pěny [27].

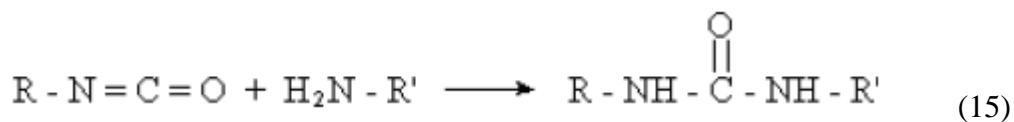
2.1 Polyuretany

Pod pojmem polyuretany (PUR) rozumíme skupinu polymerů vzniklých reakcí více-funkčních isokyanátů s polyalkoholy. Reakcí isokyanátů s alkoholy vznikají uretany (estery karbamové kyseliny) [28]:

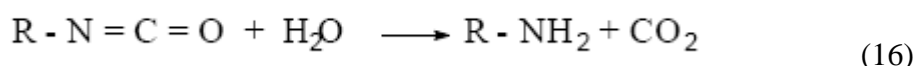


Tato hlavní růstová reakce je často záměrně nebo samovolně doprovázena dalšími vedlejšími reakcemi, kterými vznikají jiné než uretanové strukturní jednotky.

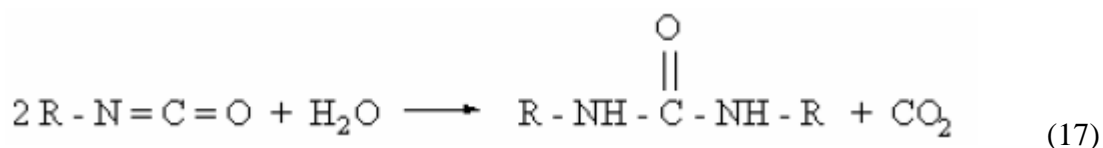
S aminy reagují isokyanáty za vzniku substituovaných močovín:



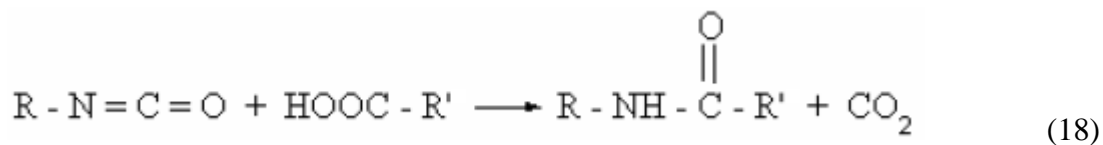
S vodou vznikají aminy a uvolňuje se CO_2 :



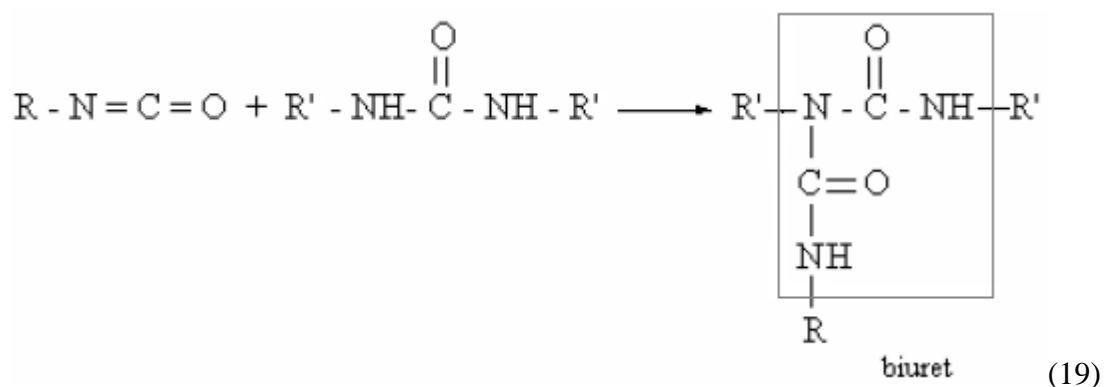
Vzniklý amin reaguje s další molekulou isokyanátu za vzniku disubstituované močoviny:



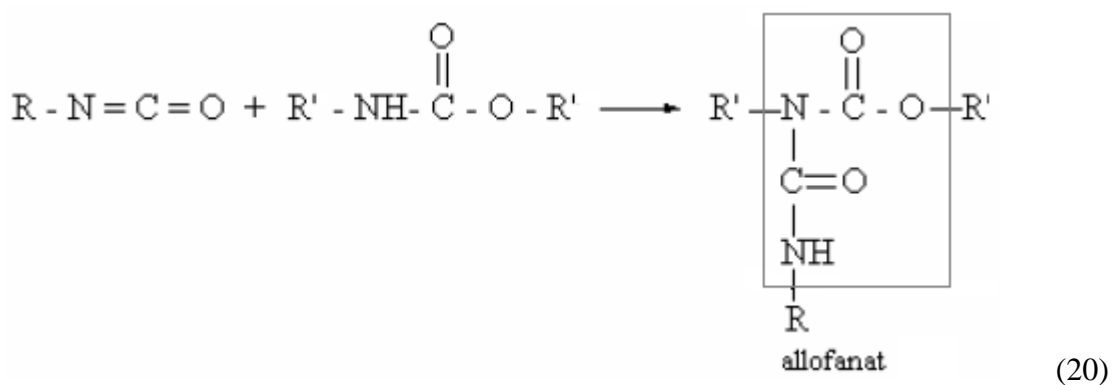
S karboxylovými kyselinami reagují isokyanáty za vzniku substituovaného amidu a CO_2 :



Za určitých podmínek může isokyanátová skupina reagovat se substituovanou močovinou za vzniku N-substituovaného biuretu:



Podobně může isokyanát reagovat také s vodíkem uretanové skupiny za vzniku N-substituovaných esterů kyseliny allofanové:



Základními surovinami pro přípravu PUR jsou polyisokyanáty, polyoly, extendery a katalyzátory [29].

- Polyisokyanáty: Přibližně 95% produkce PUR je založeno na aromatických polyisokyanátech, které jsou podstatně reaktivnější i levnější než alifatické. Dominují diisokyanátotoluen, diisokyanátodifenylmetan a diisokyanátonaftalen
- Polyoly – V praxi se používají hlavně polyetheralkoholy a polyesteralkoholy
- Extendery: Ovlivňují povahu a hustotu chemického i fyzikálního zesítení a mají vliv na konečné vlastnosti PUR. Používají se aromatické diaminy, alifatické nebo aromatické hydroxysloučeniny.
- Katalyzátory: Ovlivňují nejen celkovou rychlost, ale i poměr rychlostí reakcí vedoucích k prodloužení lineárního řetězce, které uvolňují CO₂ pro tvorbu pěny. Uplatňují se např. trietylendiamin, tributylcínacetát, dibutylcínacetát

Kombinací různých polyisokyanátů a polyalkoholů je možno připravit produkty nej-různějších vlastností [29].

Při výrobě polyuretanů se používají dva základní postupy: jednostupňový a dvojestupňový. Jednostupňovým postupem rozumíme smícháním všech složek reakční směsi najednou nebo příprava prepolymeru. U dvoustupňového postupu v prvním stupni reaguje polyol s diisokyanátem, čímž vznikne meziproduct s koncovými –NCO- skupinami tzv. prepolymer a v druhém stupni reaguje prepolymer s extendery a síťovadly za vzniku konečného produktu. V porovnání těchto dvou postupů dává lepší výsledky dvoustupňový postup, vzniká vulkanizát s lepšími vlastnostmi [30].

Polyuretany je možné využít k výrobě velké škály výrobků, a proto mají v průmyslu velký význam. Jsme schopni vyrobit jak klasické polyuretanové pěny, tak i vlákna a filmy, dále eleastomery, lepidla, polyuretanové licí pryskyřice, nátěrové hmoty i pojiva [30].

2.1.1 Polyuretanové pěny

Podle struktury se rozlišují měkké a tuhé PUR pěny o různé měrné hmotnosti, struk-tuře otvorů a rozdílných mechanických vlastnostech.

- Základní složky měkkých pěn tvoří směs 2,4- a 2,6-toluendiisokyanátu a polyolu. Hlavním nadouvadlem je plynný CO₂, vznikající reakcí vody s isokyanátovou skupinou. Měkké PUR pěny mají strukturu pěny s otevřenými, propojenými póry.

Způsob výroby: Připravují se kontinuálně na zpěňovacích strojích se směšovací hlavou, do které se přivádí všechny složky včetně pomocných látek. Zde se za vysokých otáček připravuje homogenní kapalina, která se lije nejčastěji do forem, nebo na pás, zde proběhnou všechny reakce vedoucí k polymeru a napěnění v průběhu několika sekund, vzniklým CO₂ (reakcí vody s -NCO skupinou). Výrobek se z formy vyjímá až po několika desítkách minut.

- Tuhé PUR pěny jsou sítě s hustšími meziřetězcovými vazbami nebo místy síťování a větším obsahem tuhých uretanových úseků. Převažuje struktura uzavřených pórů v pěně, protože stěny pórů jsou pevnější. Pevnost pěny vzrůstá s měrnou hmotností.

Způsob výroby: Po smíchání složek se roztok nalévá do uzavřených i otevřených forem. Zpravidla se postupuje dvojestupňově, nejprve se připraví předpolymer, který se později vy-pěňuje po přidavku vodou [30], [31].

3 AKUSTIKA

3.1 Zvuk a jeho charakteristika

Zvukem rozumíme každé mechanické vlnění, které se šíří od zdroje ve vlnoplochách libovolným prostředím, fázovou rychlostí závislou na fyzikálních vlastnostech prostředí. Zvuk vzniká kmitáním částic pružného prostředí, které na sebe vzájemně působí elastickými silami. Zvuk je zvláštní případ tzv. elastických vln. Rozruch se šíří ze zdroje fázovou rychlostí, ale prostředí, které ho přenáší, se nepohybuje, nýbrž částice prostředí kmitají kolem rovnovážných poloh. Leží-li kmitočet zvuku v rozsahu slyšitelnosti lidského ucha, od 16 Hz do 20 kHz, vnímáme zvuk sluchem. Akustické vlnění o kmitočtu vyšším než 20 kHz spadá do oblasti ultrazvuku. Akustické vlnění o kmitočtu nižším než 16 Hz se označuje jako infrazvuk. Akustické vlnění postupuje od místa rozruchu na všechny strany. Je-li prostředí izotropní, šíří se rozruch všemi směry stejně rychle. Místa, do nichž dospělo vlnění ze zdroje za tutéž dobu, leží na spojitě ploše, tzv. vlnoploše. Vlnoplochou rozumíme geometrické místo bodů, které kmitají v daném okamžiku se stejnou fází. V obecných případech mohou mít vlnoplochy libovolný tvar. Zvlášť důležité jsou vlnoplochy kulové a rovinné [32].

3.2 Základní veličiny v akustice

Zvuk, který se šíří prostředím je zpravidla charakterizován některou akustickou veličinou. Je to např. akustický tlak, akustická rychlost a akustický výkon. Důležitým parametrem je vlnová délka [30], [32].

Vlnová délka λ [m] je vzdálenost, kterou urazí zvuková vlna za dobu jednoho kmitu, tedy periodu T . Jestliže se akustická vlna od zdroje šíří rychlostí zvuku c a vlnění je s frekvencí f , pak pro vlnovou délku platí vztah [33]:

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT. \quad (21)$$

Akustický tlak p [Pa] je definovaný jako odchylka celkového tlaku (vzduchu nebo kapaliny) od tlaku statického při vlnění v daném prostředí. Hodnota akustického tlaku je

$$p = \frac{p_0}{\sqrt{2}}, \quad (22)$$

kde p_0 je amplituda akustického tlaku [33].

Akustická rychlost v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] udává rychlost s jakou kmitají jednotlivé částice prostředí, kterým se šíří akustická vlna. Je definována jako první parciální derivace akustické výchylky podle času

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = \omega \cdot u_0 \cos \omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right), \quad (23)$$

kde u_0 je amplituda akustické výchylky, ω je frekvence a x je vzdálenost [34].

Akustickým výkonem P [W] nazýváme množství energie, procházející za jednotku času myšlenou prostorovou plochou. Je definován vztahem

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \cdot v = p \cdot v \cdot S, \quad (24)$$

kde F je síla, p je akustický tlak, v je rychlost kmitání částic a S je plocha [33].

3.3 Pohlcování zvuku

Pohlcování zvuku v látce je vysvětlováno přeměnou akustické energie v jinou, obvykle tepelnou. K úbytku zvukové energie dochází v podstatě trojím způsobem [32]:

1. Třením mezi pohybujícími se vzduchovými částicemi a materiálem. K této přeměně kinetické energie v tepelnou dochází zejména u materiálů obsahující velké množství póřů.
2. Snížením potenciální energie zvukové vlny způsobeným relaxací akustického tlaku, k němuž dochází např. při přestupu tepla ze vzduchu do pohltivého materiálu při periodických tlakových změnách.
3. Nepružnou deformací vláken pohltivého materiálu, k níž je třeba vyšší energie než se opět z materiálu vyzáří. Jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie.

3.3.1 Činitel zvukové pohltivosti

Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk charakterizujeme hodnotou činitele zvukové pohltivosti α , který je definován jako poměr energie I_2 , pohlcené určitou plochou, k energii I_0 , která na tuto plochu dopadá, což je vyjádřeno výrazem:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0}. \quad (25)$$

Akustický výkon dopadající na 1m^2 stěny, označený jako intenzita zvuku I_0 , se rozděluje na část:

I_1 – intenzita zvuku vlny odražené,

I_2 – intenzita zvuku vlny pohlcené,

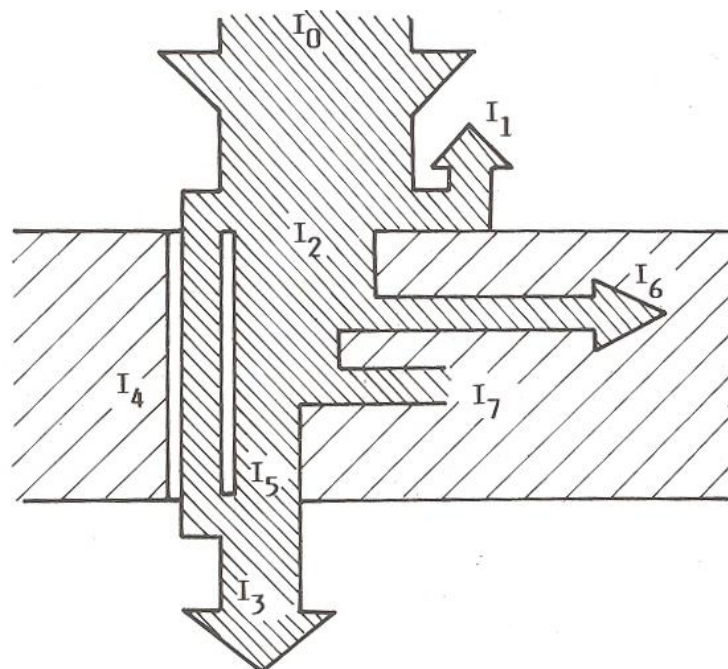
I_3 – intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem,

I_4 – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry,

I_5 – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru,

I_6 – intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí,

I_7 – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo.



Obr. 15 Schéma rozdělení akustické energie při dopadu
zvukové vlny na stěnu [34]

Činitel pohltivosti je bezrozměrné číslo, který nabývá hodnot v intervalu od 0 do 1. Stěna pohlcující zvuk úplně, má činitel pohltivosti $\alpha=1$, zatím co stěna, dokonale odrážející zvuk má tento činitel roven nule. Podobným způsobem lze definovat činitele zvukové odrazivosti β :

$$\beta = \frac{I_1}{I_0} \quad (26)$$

a činitele průzvučnosti τ [34]:

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0}. \quad (27)$$

Toto rozdělení dopadající akustické energie na jednotlivé složky vyhovuje v oblasti prostorové akustiky. Při navrhování zvukoizolačních konstrukcí je však třeba znát podíl akustické energie přeměněné ve stěně na teplo. Zavedeme proto další veličinu ε :

$$\varepsilon = \frac{I_7}{I_0}, \quad (28)$$

která vyjadřuje podíl mezi energií přeměněnou ve stěně na teplo a energií na stěnu dopadající [35].

Ve schématu na obr. 15 je vyznačená hodnota I_6 v případě zvukoizolačních krytů, jejichž stěny jsou z ocelového plechu, prakticky rovna nule. Potom můžeme na základě platnosti zákona zachování energie psát vztah [34]

$$\beta + \tau + \varepsilon = 1. \quad (29)$$

Z porovnání uvedených vztahů dále vyplývá, že

$$\alpha = \varepsilon + \tau. \quad (30)$$

3.3.2 Měření činitele zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti je závislý na kmitočtu a směru dopadu zvukové vlny. Pro kolmý dopad jej označujeme jako činitel pohltivosti pro kolmý dopad α_N , pro všesměrový dopad zvuku jako činitel pohltivosti pro všesměrový dopad α_S (Sabinův).

Měření činitele zvukové pohltivosti pro kolmý dopad se provádí metodou analýzy stojatých vln v interferometru (Kundtově trubici). Tato metoda je vhodná zejména pro předběžné měření při vývoji nových materiálů, k porovnání pohltivosti různých materiálů a jejich konstrukčního uspořádání nebo ke stanovení dalších charakteristik materiálů.

Měření činitele zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad se provádí ve speciální dozvukové místnosti. Tato metoda je přesnější a dává výsledky blížíci se technické praxi.

V obou případech se činitel zvukové pohltivosti měří a uvádí pro střední oktávové kmitočty v rozmezí 125 Hz až 4000 Hz. Podle činitele zvukové pohltivosti lze materiály rozdělit na [32]:

- špatně pohltivé materiály pro $\alpha < 0,25$
- středně pohltivé materiály pro α od 0,25 do 0,6
- dobře pohltivé materiály pro $\alpha > 0,6$

3.4 Akustické vlastnosti pórovitých materiálů

Pod pojmem porézní látka máme v akustice obvykle na mysli pevnou látku, v jejímž objemu se nacházejí malé dutinky, vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky činí asi 60-95 % celkového objemu. Materiál, tvořící kostru látky je buď vláknitý, nebo má strukturu ztuhlé pěny. Má-li látka dobře pohlcovat zvuk, musejí být její póry navzájem spojeny, aby se jimi zvuk mohl šířit látkou dále, respektive, aby mohl vzduch při akustickém kmitání proudit. Jedině tak bude možno využít prvního principu přeměny akustické energie vlivem tření. Póry nemusejí být spojeny u látek, jejichž kostra je velmi poddajná, elastická, takže zvuk do ní snadno z pórů přechází. Příkladem takových látek jsou pěněné měkké plasty [34].

Většina stavebních materiálů je velmi pórovitá, proto jsou schopny svojí porézní strukturou absorbovat dopadající akustickou energii. Děje se tak díky násobným odrazům akustického paprsku v pórech materiálu, tření vzduchu, který nese akustickou energii, o stěny pórů a přeměně akustické energie na expanzní práci periodicky stlačovaného vzduchu v pórech [25].

Podle struktury se dělí porézní materiály do tří skupin [25]:

- Vlákenné – dřevovláknité desky, minerální vlna, minerální rohože.
- Partikulární – jsou tvořeny anorganickými částicemi kameniva, které jsou lepeny organickými i anorganickými pojivy. Například sem patří akustické desky z mezerovitého betonu a mezerovité polymer betony.
- Pěnové – pěnový polyuretan a ostatní pórovité plastické hmoty.

Polyuretanové pěny je vhodné použít v místech, kde není nebezpečí požáru. Naproti tomu vláknité materiály můžeme použít v oblastech se zvýšenou teplotou [30].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

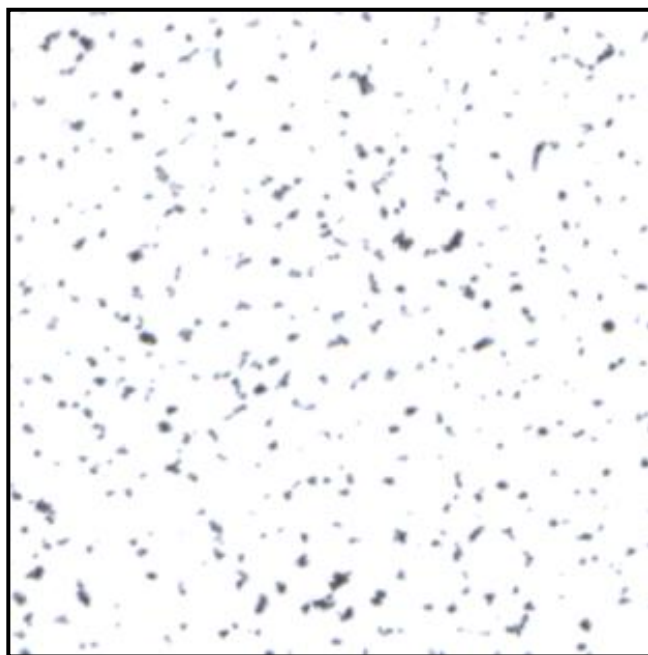
4 ODHAD VELIKOSTI PÓRŮ

Fyzikální (a hlavně akustické) vlastnosti polymerní pěny s otevřenými póry jsou silně ovlivňovány pórovou strukturou této pěny. Parametry, jako celkové množství pórů jsou jednoduše dosažitelné experimentem, ale stanovit distribuci velikosti pórů je mnohem obtížnější [23].

Tato část je zaměřena na experimentální stanovení distribuce velikosti pórů metodou otiskování povrchu řezu polyuretanové pěny s otevřenými póry na papír a následnou rekonstrukcí její reálné struktury ze získaných obrazových map s využitím Voronoiových teselací. Ze zjištěných hodnot ploch bude využito standardních stereologických vztahů a pomocí počítačového modelu řezu koulí s danou distribucí velikostí vypočítána distribuce objemů pórů. Výsledek bude porovnán i s daty pořízenými počítačovou tomografií (CT) [36].

4.1 Otisk a skenování pěn

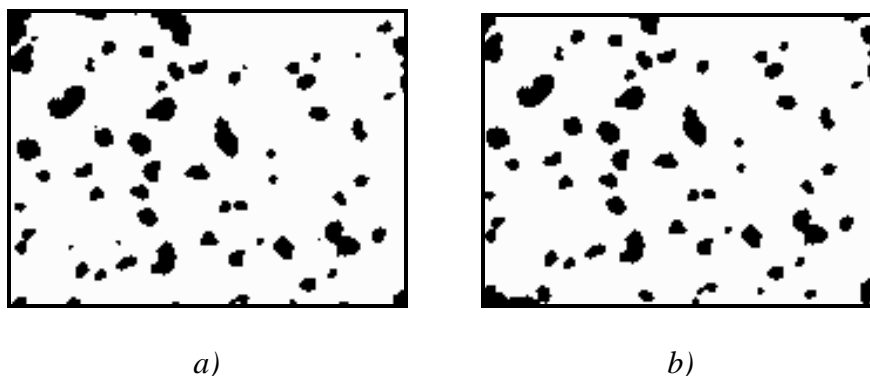
Pět vzorků PUR pěn s otevřenými póry bylo nastříháno na kvádry o ploše cca. 2 cm², jejichž povrchy byly potřeny razítkovou barvou. Za použití speciálního lisu, který zaručoval konstantní deformaci byly tyto plochy otištěny na papír a následným skenováním vznikly standardní binární obrazové mapy (Obr. 16) použitelné pro obrazovou analýzu.



Obr. 16 Binární obrazová mapa

4.2 Obrazová analýza

Obrazová analýza byla prováděna pomocí EDM v programu Tessellation, jehož prostředí je v příloze P I a jeho příkazy v příloze P II. Obrazové mapy byly zbaveny šumu způsobeného možnými nečistotami papíru, snímače skeneru apod. (Obr. 17).



Obr. 17 Výsledek snížení šumu a) je zobrazení originálního části obrázku, b) snížení šumu uvnitř pórů.

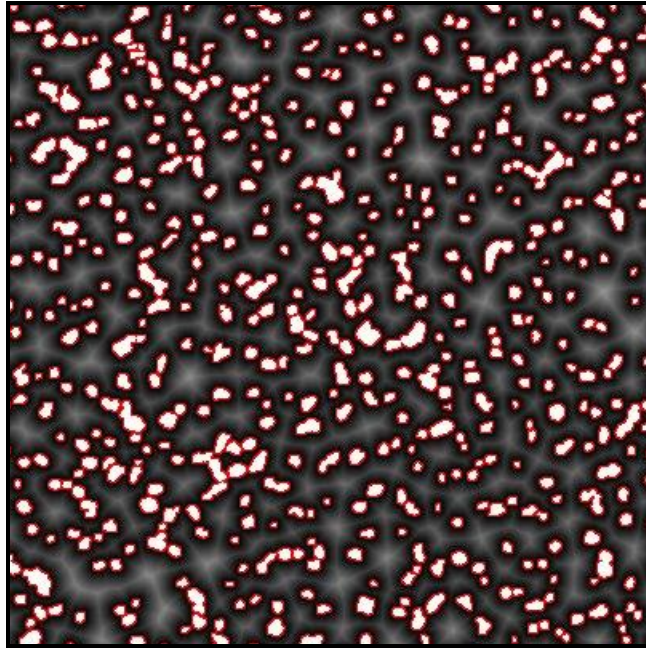
Po této úpravě byla vypočítána Euklidovská distanční mapa (EDM).

4.2.1 Euklidovská distanční mapa (EDM)

Tato metoda, která je běžně používaným nástrojem v obrazové analýze je založena na principu přiřazení hodnoty $b_{pq} = 1$ každému pixelu, reprezentujícímu objekt (černé oblasti) a hodnoty $b_{pq} = 0$ každému prázdnému (bílému) pixelu, znázorňujícímu pozadí, v p -té řadě a q -tém sloupci dané obrazové mapy. Pro každý bílý bod b_{ij} je pak určena vzdálenost k nejbližšímu černému bodu. Výpočet EDM je možno popsat matematickým vztahem:

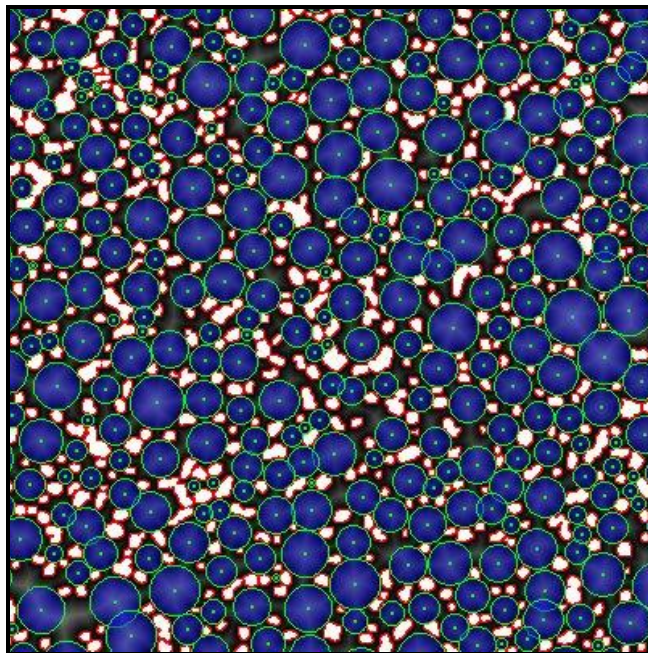
$$d_{ij} = \min_{1 \leq p, q \leq N} (\sqrt{(p-i)^2 + (q-j)^2} | b_{pq} = 1). \quad (31)$$

Výsledek výpočtu EDM je znázorněn na obrázku (Obr. 18). Červeně označené oblasti je možno považovat za okraje pórů a proto se EDM vztahuje právě na ně. Odstíny šedé znázorňují oblasti se stejnou minimální vzdáleností k černým objektům, bílé oblasti lze chápat jako středy pórů [36].



Obr. 18 Grafické znázornění EDM

Za předpokladu, že póry jsou kulové, lze zjištěné středy pórů položit jako středy kružnic vepsaných do vakancí obrazové mapy (Obr. 19). Tato aproximace slouží pouze ke stanovení středů pórů, pro vlastní aproximaci pórů je nutno použít Voronoiovu teselaci [36].



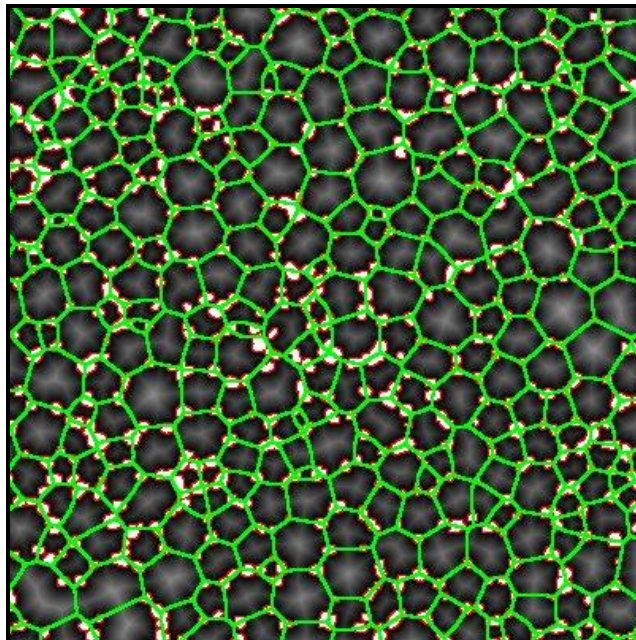
Obr. 19 Zjištěné středy pórů aproximované středy vepsaných kružnic

4.2.2 Voronoiova teselace

Je-li $BP = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ sada bodů v d -rozměrném prostoru \mathbf{R}^d (v našem případě rovina $d = 2$), pak je BP Voronoiova teselace, rozdělující prostor, který spojuje oblast $V(p_i)$ s každým generátorem p_i z BP v takový způsob, že všechny body v $V(p_i)$ jsou bližší k p_i , nežli k nějakému dalšímu bodu v BP .

$$V(p_i) = \{x \in \mathbf{R}^d, \|x - p_i\| \leq \|x - p_j\|\} \text{ pro } i \neq j, \quad (32)$$

kde $\|x - p_i\|$ je euklidovská vzdálenost. Sjedení všech buněk $V(p_i)$ je hlavní Voronoiova teselace. Voronoiova teselace založená na lokálních maximech EDM (Obr. 19) je v obrázku 20.



Obr. 20 Voronoiova teselace založená na lokálním maximu EDM (zelená) a původní rovinový řez struktury pěny (bílá).

Plochy Voronoiových buněk mohou být snadno spočítány a využity jako odhad ploch rovinových řezů pórů [23].

4.2.3 Prostorové zobecnění

Plochy buňky na obr. 20 jsou plochy řezů, ale mi potřebujeme informace o objemu pórů. Existují tři způsoby jak získat objemy pórů.

▪ Nejjednodušším způsobem je aproximace pórů koulemi stejné velikosti. Zde platí vztah mezi střední plochou náhodného řezu koule Ea a jejím objemem Ev :

$$Ev = C' \cdot (Ea)^{3/2}, \quad (33)$$

kde

$$C' = \sqrt{\frac{6}{\pi}} = 1,382. \quad (34)$$

Tento vzorec se stejnou hodnotou C' je používám v ASTM pro standardní odhad velikosti zrna v kovech. To ukazuje že vzorec není přesně omezen na koule a může být aplikován také pro nepravidelnější tvary.

▪ Dalším způsobem odhadu velikosti pórů je využití Wicksellovy rovnice (35). Ta definuje pravděpodobnostní hustotní funkci (PDF) udávající vztah mezi průměrem řezu pórem d , průměrem jeho skutečným rozměrem D a střední hodnotou Ed :

$$f_d(d) = \frac{d}{Ed} \int_d^{D_m} \frac{f_D(D)}{\sqrt{D^2 - d^2}} dD. \quad (35)$$

pro $0 \leq d \leq D_m$, kde D_m je maximum z D a d .

Tento vztah může posloužit jako model řezů koulemi s danou distribucí pro reálný odhad velikosti pórů a její distribuci.

▪ Poslední, nejpřesnější, ale také nejnáročnější metoda odhadu velikosti pórů je výpočet prostorové EDM, ze které lze odvodit přímo velikost jednotlivých pórů, nicméně tato metoda je příliš výpočetně složitá a proto se nepoužívá.

Využití Wicksellovy rovnice je dobrým kompromisem mezi jednoduchostí, ale nízkou přesností první metody, a správností, ale náročností metody poslední [23], [36].

4.3 Vzorky materiálů

Pět vzorků PUR pěn s otevřenými póry, označených A-E (Obr. 21-25) bylo metodou otisku povrchu řezu na papír a následným skenováním podrobena obrazové analýze v teselačním programu (viz kapitoly 4.1 a 4.2). Ze získaných hodnot velikosti ploch byla zjišťována distribuce velikosti pórů.

U všech vzorků byla vypočítána jejich hustota (Tab. 1). Vzorek E měl označení HR 3836 a vzorek D byl CRHM. U vzorků A, B a C jsme jejich výrobní označení nevěděli, ale to pro náš experiment nebylo důležité.

Vzorek	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
A	21,05
B	27,59
C	23,49
D	34,42
E	37,57

Tab. 1 Hustota vzorků



Obr. 21 Vzorek A



Obr. 22 Vzorek B



Obr. 23 Vzorek C



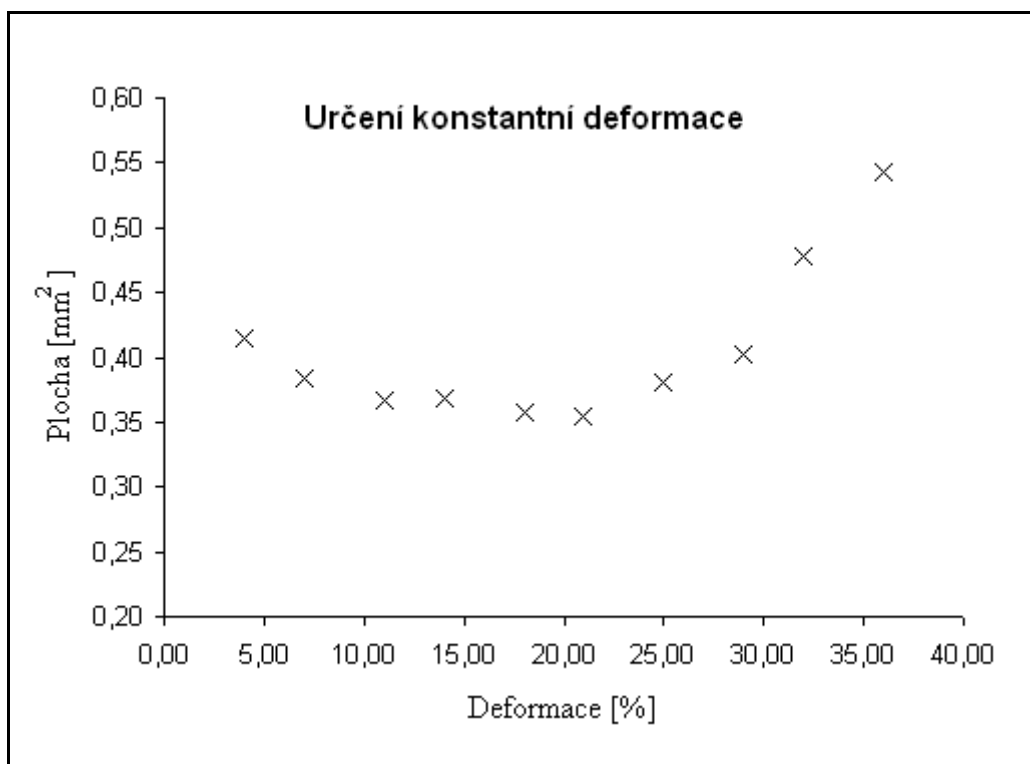
Obr. 24 Vzorek D



Obr. 25 Vzorek E

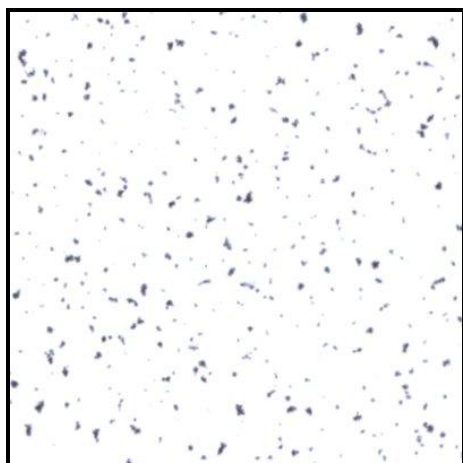
4.4 Určení konstantní deformace

Při určování, z jakou deformací budeme provádět otisky jednotlivých vzorků jsme použili tři kusy z jednoho vzorku PUR, konkrétně vzorku A. Ty byly otištěny na papír při různých deformacích a následně skenovány s rozlišením 1000 dpi (1 px=0,025 mm). Již zde byly dobře viditelné rozdíly při různých deformacích, což lze vidět u přiložených obrázků. Z každého binárního obrazu byl vždy ze stejného místa vyříznut čtverec o ploše 800 x 800 px. Poté byla provedena analýza obrazu v teselačním programu. Z výsledných dat byl vypočítán průměr ploch a jeho závislost při různých deformacích byla vynesena do grafu 1 a zvolena konstantní deformace otisku pro všechny ostatní vzorky.

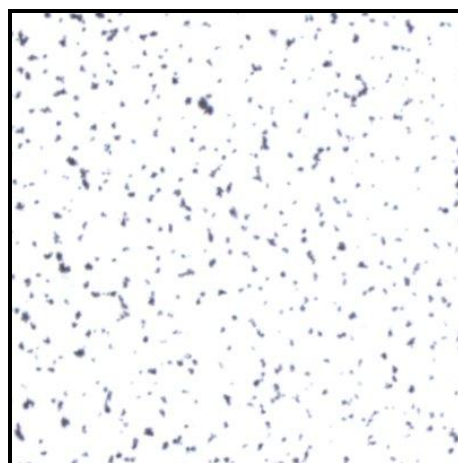


Graf 1 Závislost velikosti plochy na deformaci

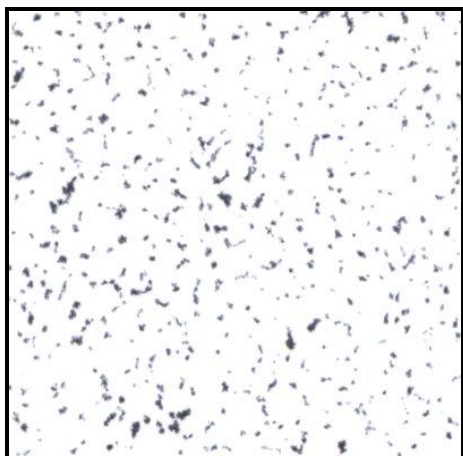
Z grafu lze vyčíst, že otisky vzorků je dobré volit mezi 5 % až 25 % deformace (Obr. 27-29), kde průměry ploch vyšly přibližně stejně. U první deformace, která byla pod 5% vznikaly větší plochy (Obr.26) z důvodu, že vzorek nebyl dostatečně zatížen a proto nedošlo k úplnému otisku pórů. Při větším zatížení vzorku (Obr. 30 a Obr. 31) byl stejný problém jen s tím rozdílem, že vzorek byl příliš stlačen a deformace způsobila vznik velkých hranic pórů, vytvářely se plochy pórů z kaněk barvy atd.



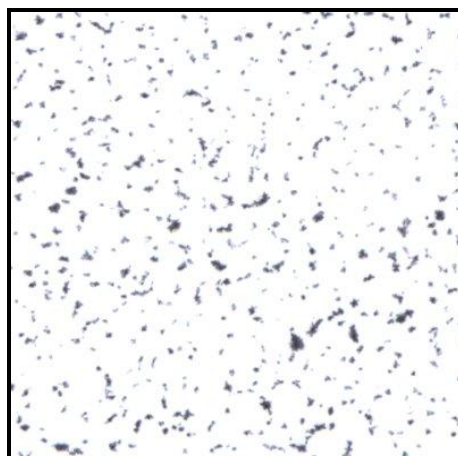
Obr. 26 Deformace 4 %



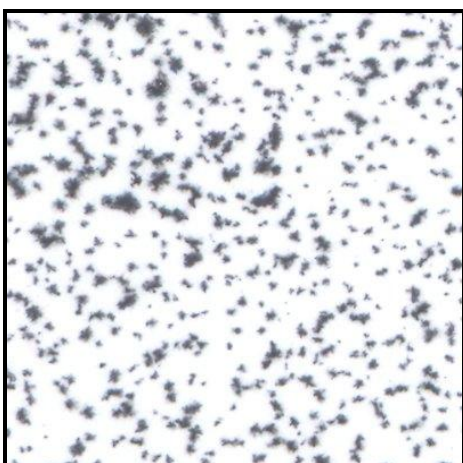
Obr. 27 Deformace 7 %



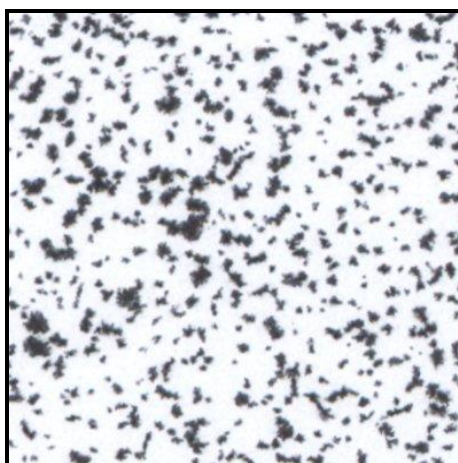
Obr. 28 Deformace 14 %



Obr. 29 Deformace 18 %



Obr. 30 Deformace 29 %

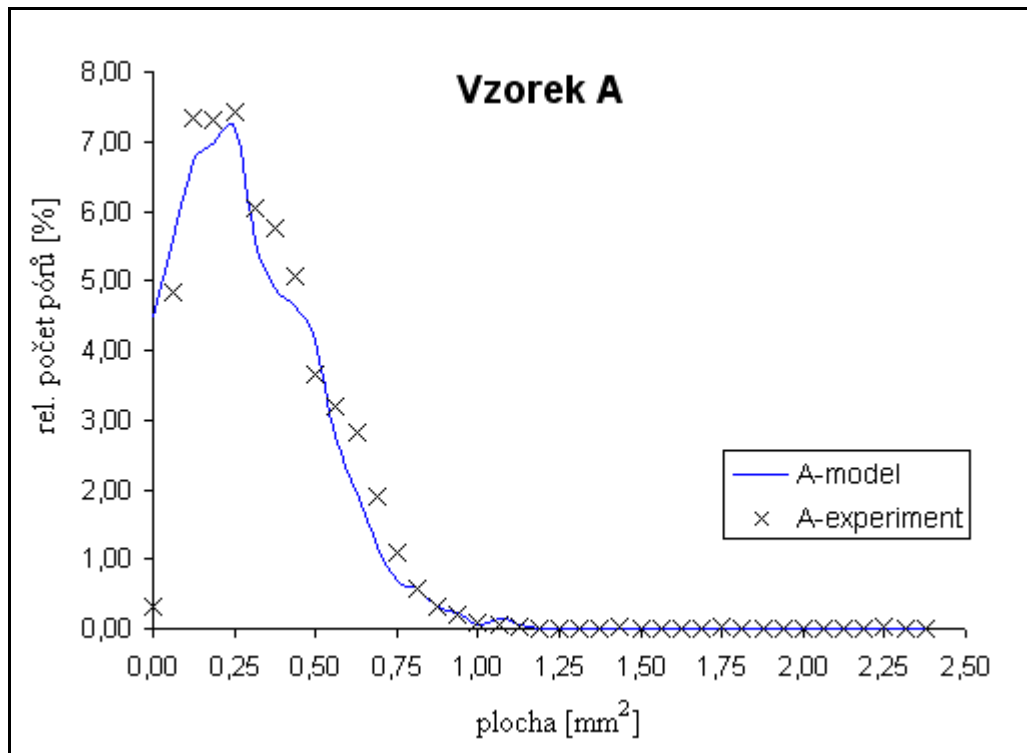


Obr. 31 Deformace 36 %

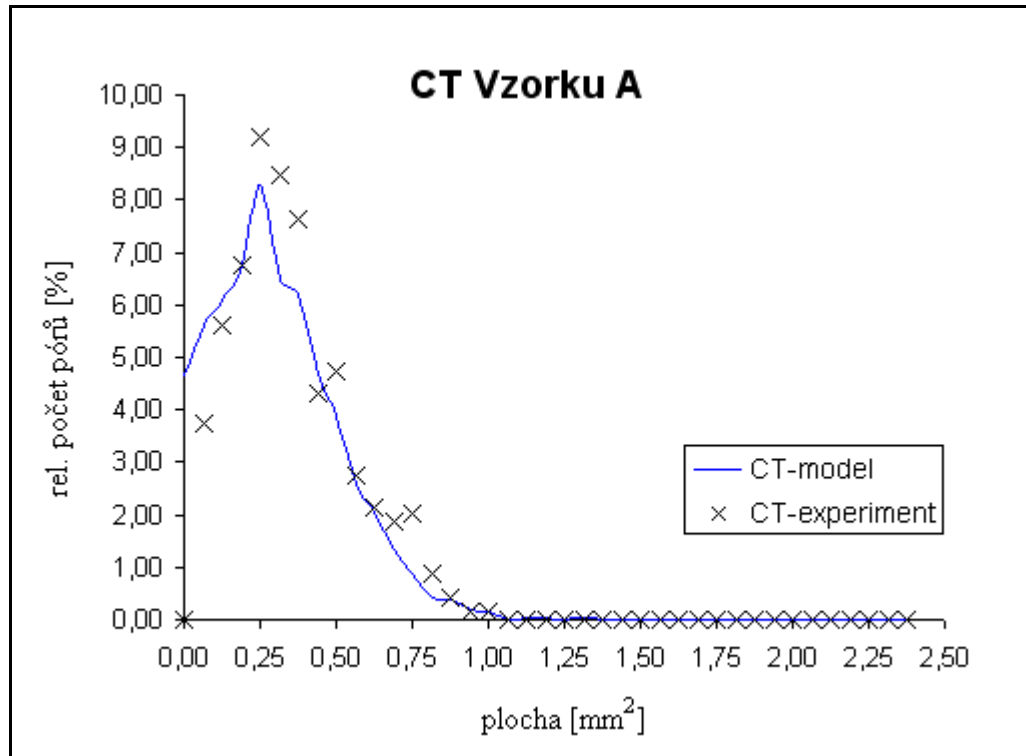
K určení konstantní deformace otisku vzorků bylo tedy na výběr od 5% do 25% deformace. Nakonec byla zvolena deformace 14 %. Při této deformaci byly prováděny otisky všech vzorků ke stanovení distribuce velikosti pórů.

4.5 Distribuce velikosti pórů

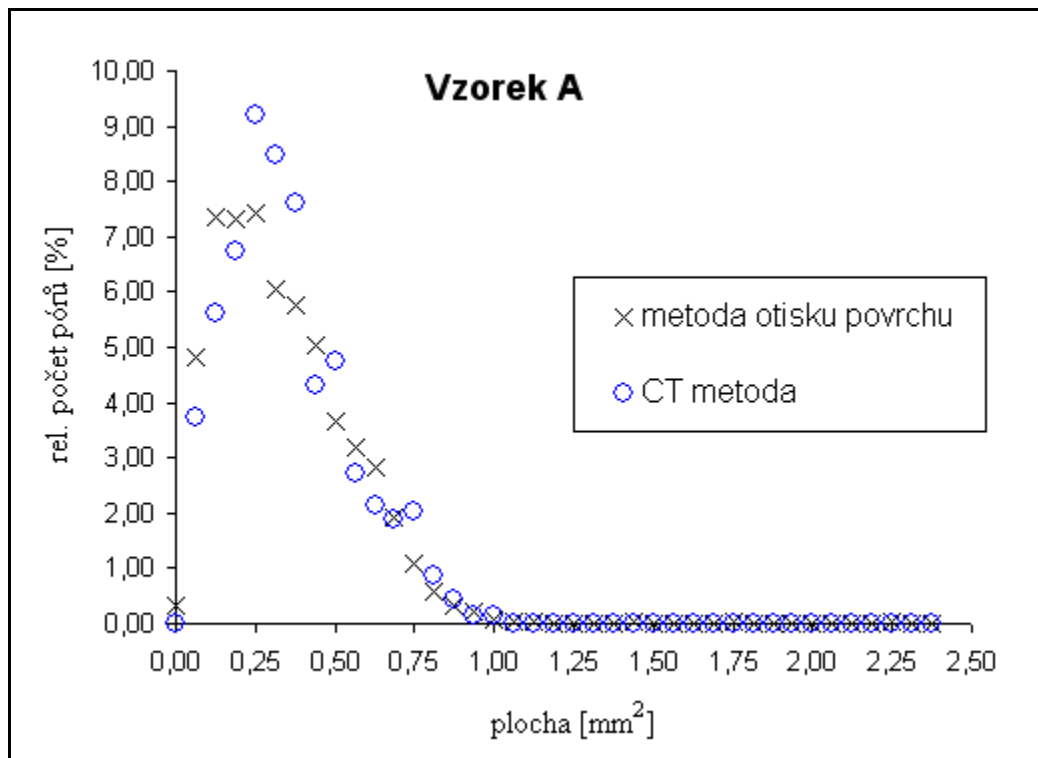
Model distribuce byl simulován pomocí makra v MS Excel jehož prostředí a popis jednotlivých sloupců jsou v příloze P IV a P V. VBA kód je uveden v příloze P VI. Výpočty byly prováděny ke zjištění průměrné hodnoty poloměru koule a směrodatné odchylky mezi nejmenším rozdílem teoretických a experimentálních hodnot ploch řezu. Výsledky distribuce pro jednotlivé vzorky jsou v grafech 2-8.



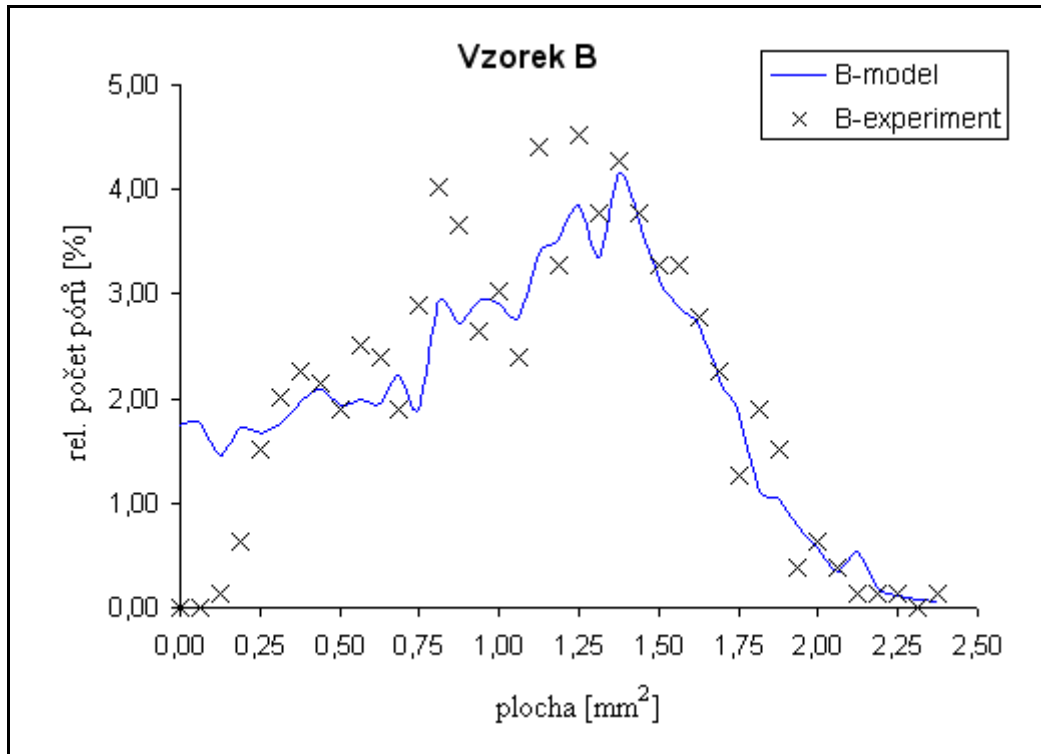
Graf 2 Distribuce velikosti pórů vzorku A pro $r=0,37$ mm; $\sigma=0,08$



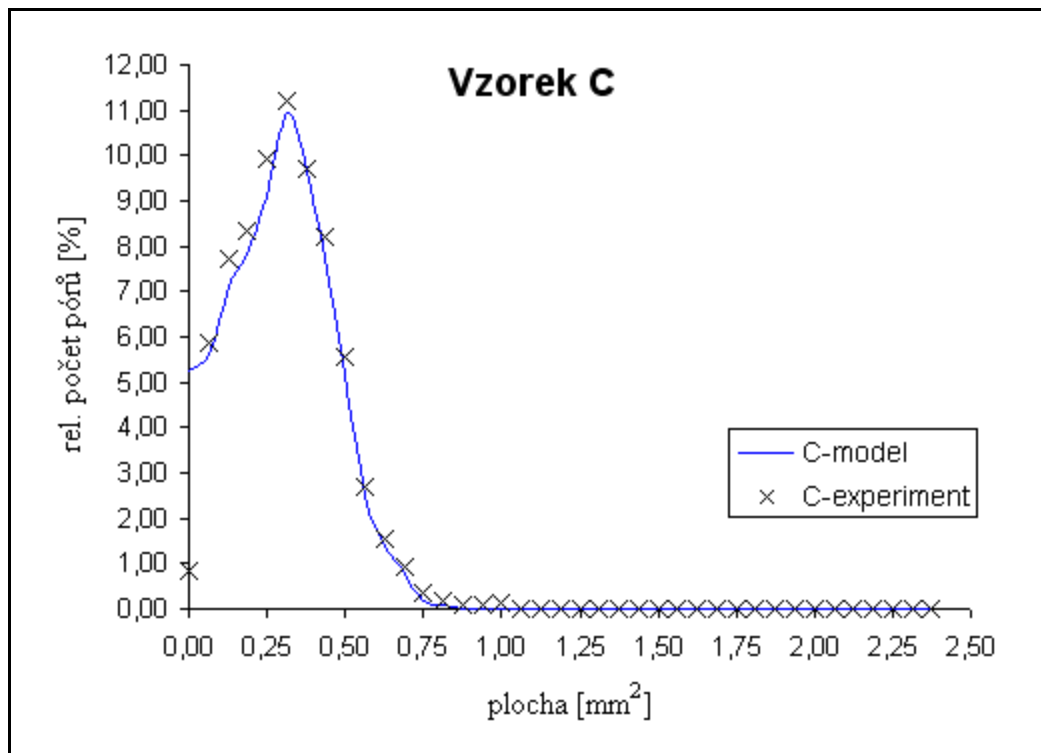
Graf 3 Distribuce velikosti pórů vzorku A pro $r=0,37$ mm; $\sigma=0,08$ metodou počítačové tomografie (CT)



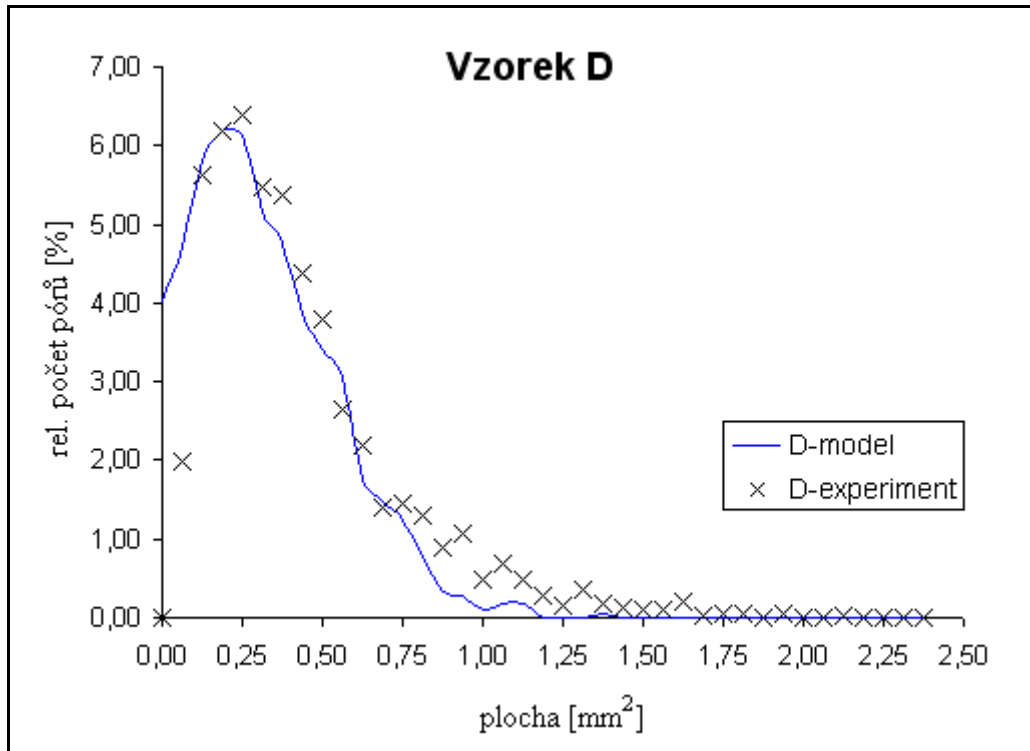
Graf 4 Srovnání distribuce velikosti pórů vzorku A metodou počítačové tomografie (CT) a metodou otisku povrchu řezu



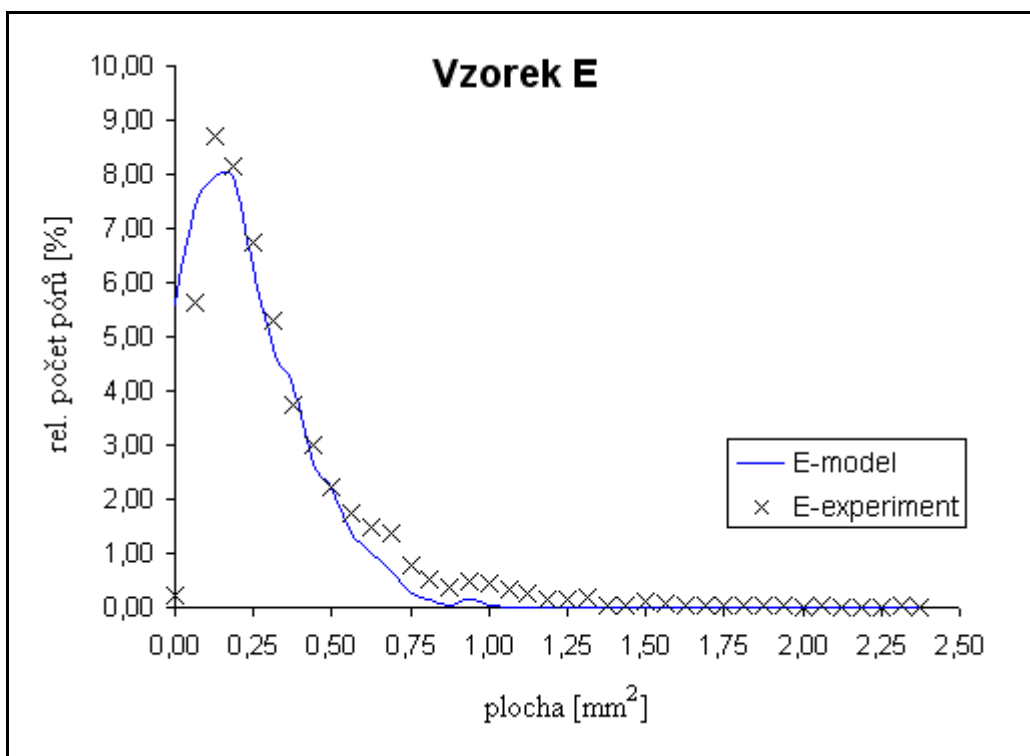
Graf 5 Distribuce velikosti pórů vzorku B pro $r=0,70$ mm; $\sigma=0,07$



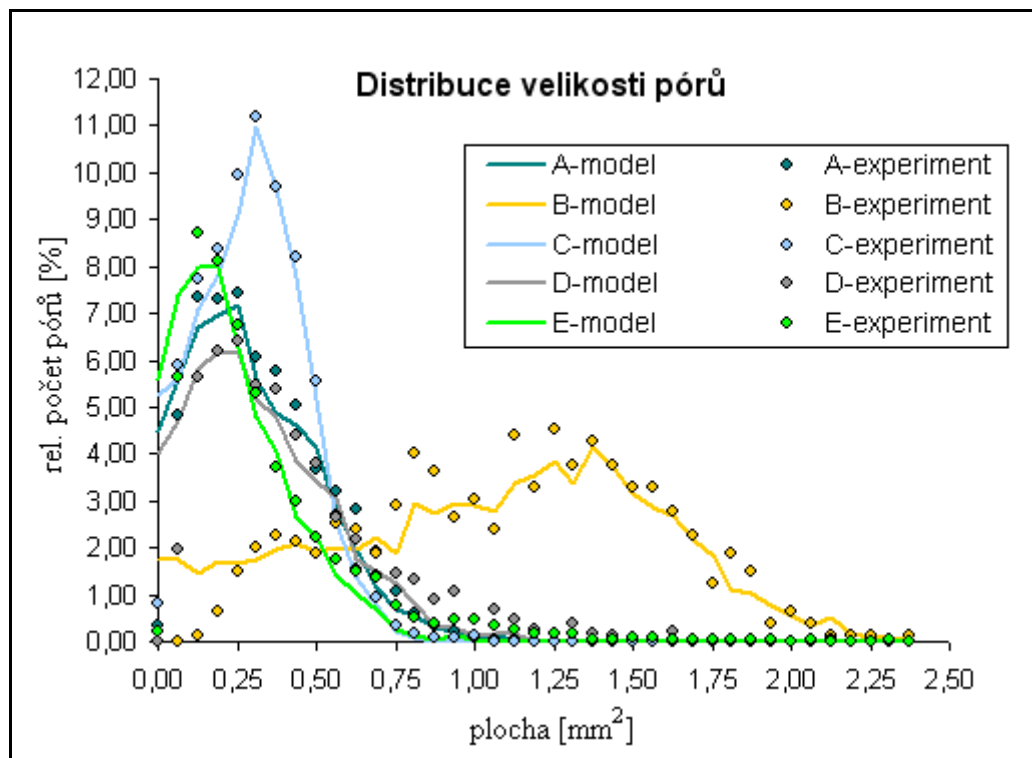
Graf 6 Distribuce velikosti pórů vzorku C pro $r=0,38$ mm; $\sigma=0,05$



Graf 7 Distribuce velikosti pórů vzorku D pro $r=0,37$ mm; $\sigma=0,10$



Graf 8 Distribuce velikosti pórů vzorku E pro $r=0,32$ mm; $\sigma=0,09$



Graf 9 Porovnání experimentálně a modelově zjištěných distribucí rovinných řezů pórů.

Z grafu lze vidět, že vzorky mají podobnou distribuci velikosti pórů s velkým počtem malých a nízkým počtem velkých pórů. Výjimku tvoří vzorek B, který je charakterizován širší distribucí velikostí, jehož distribuční křivka (B-model) se špatně shoduje s experimentálními daty.

Špatná shoda experimentálních hodnot s modelem u prvního až třetího bodu je zřejmě způsobena nedostatečnou citlivostí – rozlišením skeneru, který nedokáže rozpoznat příliš malé buňky. Proto při hledání optimální distribuční funkce první tři body grafu ignorujeme.

4.6 Objemy pórů

- Výpočet středního objemu koule s průměrným poloměrem:

Zde byl použit standardní vzorec pro výpočet objemu koule $V = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3$, kde jako r byl použit modelem vygenerovaný průměrný poloměr.

- Výpočet průměrného středního objemu koule E_{V2} :

Pomocí simulace byla zjištěna nejen průměrná hodnota, ale i distribuce poloměru koulí. Proto lze průměrný střední objem koule vypočítat i tak, že vypočteme objem každé z koulí a tyto objemy zprůměrujeme.

- Výpočet středního objemu podle ASTM:

S využitím rovnice (33) byly velikosti ploch řezů převedeny na střední objemy E_{V3} .

Vzorek	A	CT vz. A	B	C	D	E
E_{V1} [mm ³]	0,21	0,22	1,46	0,23	0,21	0,13
E_{V2} [mm ³]	0,24	0,25	1,53	0,24	0,26	0,16
E_{V3} [mm ³]	0,31	0,33	1,67	0,27	0,44	0,31

Tab. 2 Střední objemy pórů vzorků PUR pěn

5 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI

5.1 Měření činitele zvukové pohltivosti α

Činitel zvukové pohltivosti byl měřen pro vzorky A-E, které jsou uvedeny v kapitole (4.3) o dvou průměrech (30 mm a 100 mm) na Kundtově trubici pro malý a velký vzorek zvlášť. Tloušťky materiálů jsou uvedeny v Tab. 3. Výsledná křivka byla dopočítána jako kombinace křivek pro malý a velký vzorek. Rozsah frekvencí byl od 0 do 6400 Hz.

Vzorek	Tloušťka [mm]
A	28
B	20
C	19
D	15
E	15

Tab. 3 Tloušťka vzorků

5.1.1 Měřicí přístroje

- Tříkanálový PULSE multianalyzátor Brüel & Kjaer typ 3560-B-030

Přenosný přístroj umožňující zpracování a analýzu signálů v reálném čase ve frekvenčním rozsahu od 0 Hz do 25,6 kHz. V kombinaci s dvoumikrofonovou trubicí Brüel & Kjaer 4206 se používá k měření absorpčních charakteristik materiálů. V kombinaci se zdrojem vibrací Brüel & Kjaer 4810 slouží ke zjišťování přenosového útlumu, komplexního modulu pružnosti a činitele vnitřních ztrát. Používá se taky jako analyzátor hladiny zvuku [37].



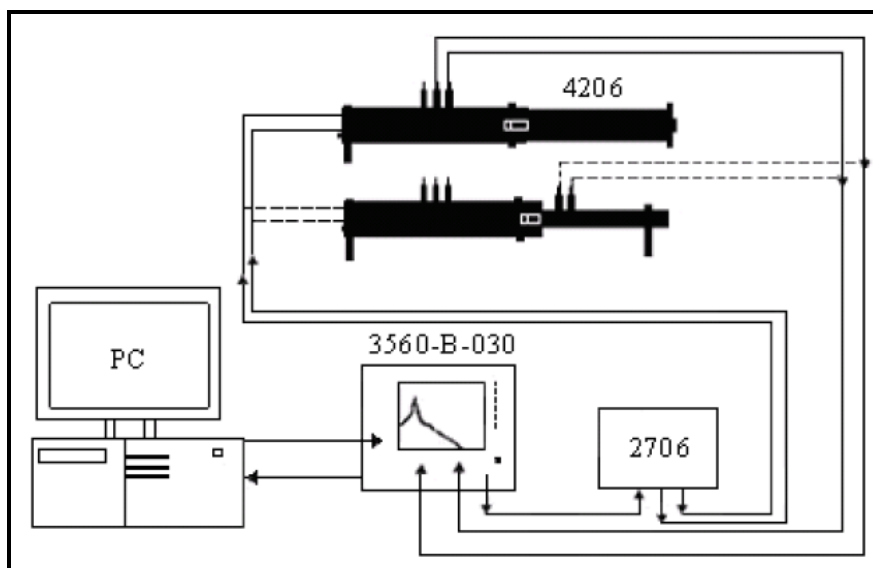
Obr. 32 Multianalyzátor Brüel & Kjaer typ 3560-B-030 [37]

- Dvumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206

Používaná ke zjišťování koeficientu zvukové pohltivosti, koeficientu zvukové odrazivosti pro malé vzorky. Skládá se ze dvou trubic o průměru 100 a 29 mm umožňující měření ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 1.6 kHz a od 500 Hz do 6.4 kHz. Pro samotnou analýzu využívá dvoukanálový signální analyzátor Brüel & Kjaer typ 2034 a aplikační software BZ5050 zabezpečující jednoduchou obsluhu prostřednictvím PC [37].

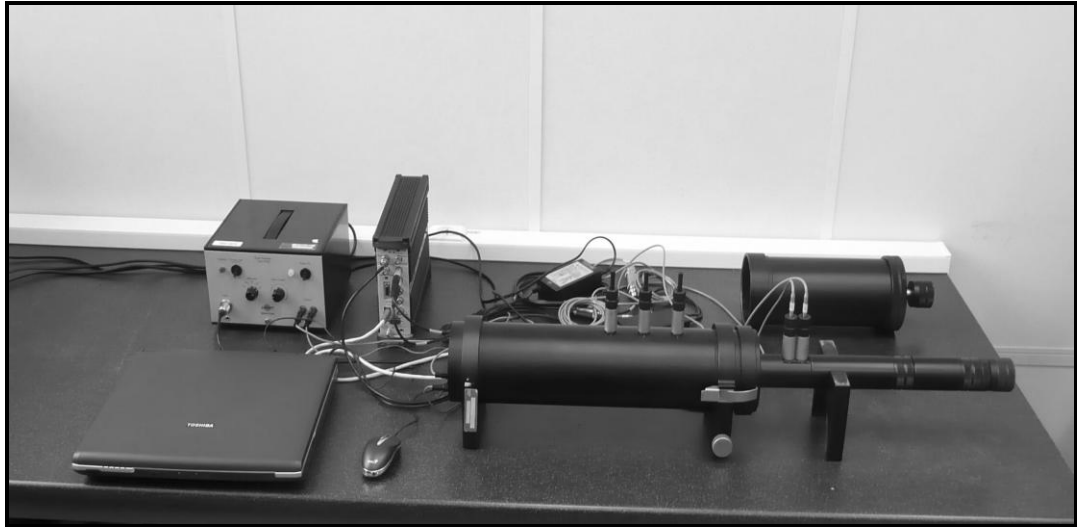


Obr. 33 Dvumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206 [37]



Obr. 34 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření činitele zvukové pohltivosti [38]

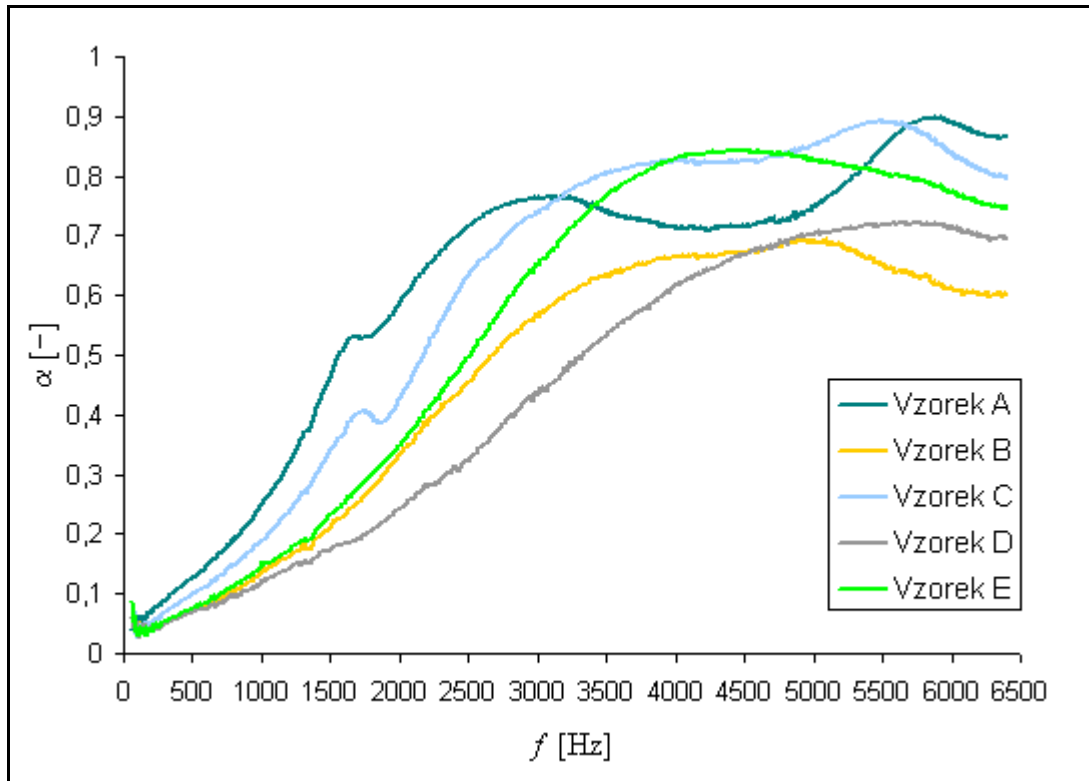
Schéma na obr. 34 znázorňuje zapojení aparatury s velkou a malou trubicí. Sestava obsahovala tříkanálový multianalyzátor PULSE B&K 3560-B-030, zesilovač B&K 2706 a dvoumikrofonovou trubicí B&K 4206.



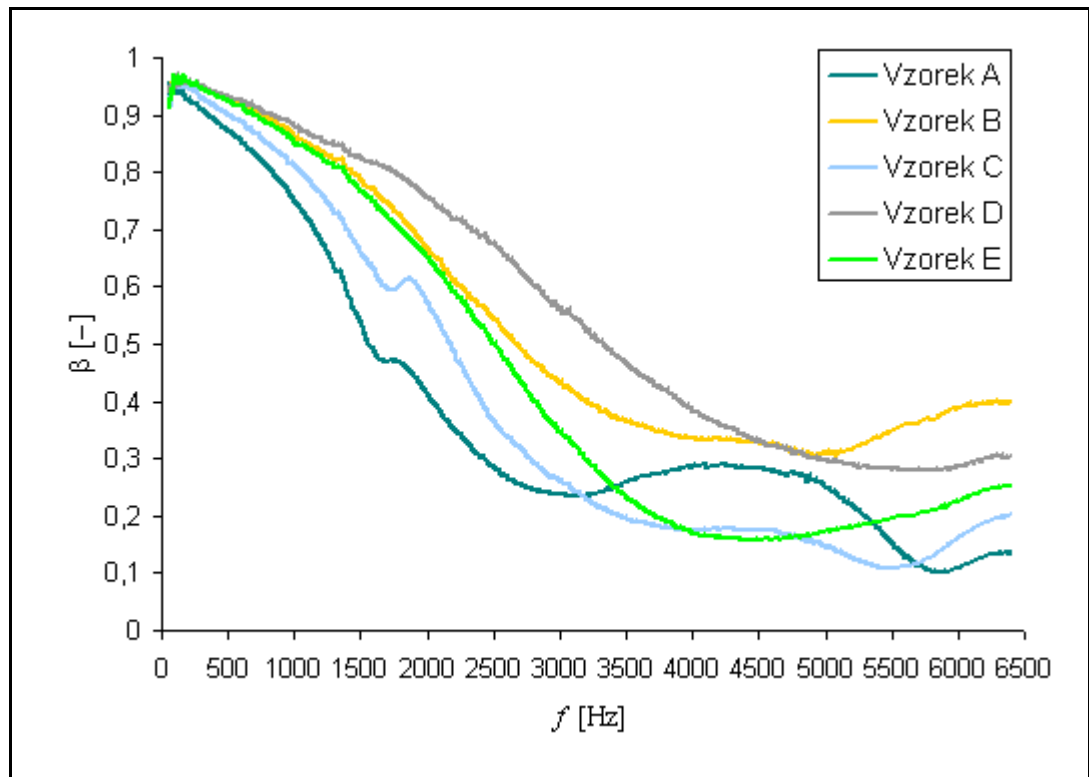
Obr. 35 Fotografie měřicí aparatury pro měření činitele zvukové pohltivosti [38]

5.2 Výsledky měření

Pro vyhodnocení dat z multianalyzátoru PULSE byl použit software LabShop. Křivky v nízkých frekvencích byly spojeny s křivkami ve vysokých frekvencích. Výsledná data byla zkopírována do MS Excel a vynesena do grafů. Ze získaných hodnot činitele zvukové pohltivosti α se vypočítal i činitele zvukové odrazivosti β .



Graf 10 Frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti



Graf 11 Frekvenční závislost činitele zvukové odrazivosti

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala odhadem velikosti pórů v otevřených pórovitých pěnách metodou otisku povrchu řezu. Bylo použito pět vzorků měkkých polyuretanových pěn, jehož povrch byl pokryt razítkovou barvou a za použití speciálního lisu byl papír s otiskem vzorku převeden do digitální podoby pomocí skeneru. Snímky z rovinných řezů byly zpracovány pomocí EDM v programu Tessellation. Ze získaných hodnot ploch byla s využitím stereologických vztahů a pomocí počítačového modelu řezu koulí vypočítána distribuce velikosti pórů.

Experimentálně zjištěné distribuce byly porovnány s modelovými distribučními křivkami. Vzorky PUR pěn měly podobnou distribuci velikosti pórů s velkým počtem malých a nízkým počtem velkých pórů. Výjimkou byl vzorek B, který byl charakterizován širší distribucí velikostí. Srovnání distribuční křivky velikosti pórů vzorku A metodou počítačové tomografie a metodou otisku povrchu řezu byla vynesena do grafu 4. Z velikostí ploch řezů byly odhadnuty objemy pórů.

Pomocí tří různých metod byly zjištěny průměrné objemy koulí, které vyšly s různými výsledky. První metodou byl výpočet objemu koule E_{v1} s vygenerovaným průměrným poloměrem a použitím standardního vzorce pro výpočet objemu koule. Pomocí simulace byl druhou metodou zjištěn i průměrný objemu koule E_{v2} . Poslední metodou výpočtu objemu podle ASTM byla vypočtena hodnota E_{v3} . Objemy pórů pro všechny vzorky byly uvedeny v tab. 2. Výsledky objemů mezi jednotlivými výpočty není způsoben chybou měření, ale rozdílným způsobem výpočtu.

Na závěr se provedlo měření akustických vlastností zkoumaných vzorků. Z akustických veličin byl měřen činitel zvukové pohltivosti a činitel zvukové odrazivosti. Závislost těchto veličin na frekvenci zvuku byla uvedena v grafech 10 a 11. U vzorku B, tedy vzorku s největší velikostí pórů byla hodnota činitel zvukové pohltivosti nejmenší. U zbývajících vzorků s přibližně stejnou distribucí velikostí pórů by srovnání mezi strukturou a akustickými vlastnostmi bylo ovlivněno hustotou a tloušťkou vzorku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HLAVATÝ, I; SCHMIDOVA, E; HAJDÍK, J. *Parametry jakosti svarových spojů hodnocené metodami obrazové analýzy*. [online]. [cit. 2010-03-15]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/Publikace/HlavatyFS552005.pdf>
- [2] ZMEŠKAL, O; KOMENDOVÁ, B; BŽATEK, T; JULÍNEK, M. *Hodnocení kvality tiskových bodů metodami obrazové (waveletové) analýzy*. [online]. [cit. 2010-03-15]. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/cz05_brat04.pdf
- [3] ZMEŠKAL, O; JULÍNEK, M; BŽATEK, T. *Obrazová analýza povrchu potiskovaných materiálů a potištěných ploch*. Pardubice, 2003, ISBN 80-7194-372-X
- [4] AGUILERA, J.M; STANLEY, D.W. *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering (2nd Edition)*. Springer – Verlag, 1999. 450 s. ISBN: 978-0-8342-1256-5
- [5] CLARKE, A.R; EBERHARDT, C.N. *Microscopy Techniques for Materials Science*. Woodhead Publishing, 2002. 459 s. ISBN 978-1-85573-587-3.
- [6] McCLEMENTS, D.J. *Understanding and Controlling the Microstructure of Complex Food*. Woodhead Publishing, 2007. 833 s. ISBN: 978-1-4200-6573-2
- [7] *Analýza obrazu (video image analysis)*. [online]. [cit. 2010-03-15]. Dostupný z: http://www.vscht.cz/ktk/www_324/lab/navody/oborI/obraz.pdf
- [8] FOJTŮ, J. *Hledání duplikátů pomocí metod morfologické analýzy a analýzy histogramu*. Zlín, 2005. 60 s. Bakalářská práce, UTB Zlín, FT.
- [9] MILITKÝ, J. *Obrazová analýza a matlab*. TU Liberec, [online]. [cit. 2010-03-16]. Dostupný z: http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/1Projektovani/1.2_publikace/%5B1.2.12%5D.pdf
- [10] BUSCHOW, K.H.J; a spol. *Encyclopedia of Materials – Science and Technology, Volumes 1-11*. Elsevier, 2001. 12066 s. ISBN 978-0-08-043152-9
- [11] MACHÁČEK, J. *Analýza obrazu*. [online]. [cit. 2010-03-16]. Dostupný z: <http://www.vscht.cz/sil/sem/mikroskopie/Prednaska-OA.pdf>

- [12] APTOULA, E; LEFEVRE, S. *A comparative study on multivariate mathematical morphology*. Pattern Recognition, 2007, Volume 40, Issue 11, s 2914-2929.
- [13] MARAGOS, P; SCHAFER, R.W; BUTT, M.K. *Mathematical Morphology and Its Applications to Image and Signal Processing*. Springer; 1edition, 1996. 488 s. ISBN: 0792397339
- [14] SHIN, F.Y; CHENG, S. *Adaptive mathematical morphology for edge linking*. Information Science, 2004, Volume 167, Issues 1-4, s 9-21
- [15] NOVOTNÝ, D; HRACH, R. *Advanced image analysis and its application in thin film physics*. Vacuum, 2010, Volume 84, Issue 1, s 266-269
- [16] BENEŠ, V. *Stereologie a výběr*. FS ČVUT, KTM. 1998 . [online]. [cit. 2010-03-23]. Dostupné z: http://www.statpol.cz/robust/1998_benes_98.pdf
- [17] HLUBINKA, D. *Dvourozměrná rozdělení charakteristik sférolitů: Extrémy a stereologie*. JČMF, 2004. [online]. [cit. 2010-03-23]. Dostupné z: <http://www.statpol.cz/robust/robust2004/hlubinka.pdf>
- [18] PROCHÁZKA, J. *Stereologie anisotropních materiálů*. Zlín, 2005. 80 s .Diplomová práce, UTB Zlín, FT.
- [19] OLŠAN, P. *Počítačová rekonstrukce prostorové makrostruktury sférolitů*. Zlín, 2002. 60 s . Diplomová práce, UTB Zlín, FT.
- [20] PONÍŽIL, P. *Prostorové teselace – teze k rigorózní zkoušce*. Zlín,1998. 35 s. VUT Brno, FT ve Zlíně
- [21] ČERMÁK, R. *Rovinné teselace jako model růstu sférolitů*. Zlín, 2001. 92 s . Diplomová práce, UTB Zlín, FT.
- [22] SPÁČIL, O. *Stereologie polymerních materiálů*. Zlín, 2003. 55 s . Diplomová práce, UTB Zlín, FT.
- [23] GALETKA, M. *Strukturní analýza 3D pěny z rovinných řezů*. Zlín, 2008. 49 s . Bakalářská práce, UTB Zlín, FT.
- [24] REDENBACH, C. *Modelling foam structures using random tessellations*. Stereology and Image Analysis. Ecs10: Proceedings of the 10th European Conference of ISS. Bologna. 2009.

- [25] STRUHAŘOVÁ, V. *Polyuretany a jejich využití v technické akustice*. Zlín, 2008. 60s . Bakalářská práce, UTB Zlín, FT.
- [26] MILLS, N.J. *Polymer foams handbook - Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*. Elsevier Inc, 2007. 562 s. ISBN 978-0-7506-8069-1
- [27] MATOUŠEK, T. *Foams pore size estimation and their acoustic properties*. Zlín, 2009. 71 s. Diplomová práce, UTB Zlín, FT.
- [28] MLEZIVA, J; KÁLAL, J. *Základy makromolekulární chemie*. 1 vyd. Praha. SNTL, 1986. 384 s.
- [29] MLEZIVA, J; ŠŇUPÁREK, J. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2 přepracov. vyd., Praha, Sobotáles, 2000. 537 s. ISBN 80-85920-72-7
- [30] MĚCHURA, J. *Vibroakustické vlastnosti pórovitých materiálů*. Zlín, 2006. 88 s. Diplomová práce, UTB Zlín, FT.
- [31] LAPČÍK, L; RAAB, M. *Nauka o materiálech II*. UTB Zlín, 2004. 133 s. ISBN 80-7318-229-7
- [32] VAŇKOVÁ, M. *Hluk, vibrace a ionizující záření, část I*. 1 vyd. Brno, PC-DIR, 1995. 140 s. ISBN 80-214-0695-X
- [33] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*. 1. vyd. Brno, PC-DIR Real, 1998. 177 s. ISBN 80-214-1262-3
- [34] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. 2 vyd. Praha, ČVUT, 2000. 389 s. ISBN 80-01-02246-3
- [35] URBAN, V. *Studium vlivu struktury materiálu na jeho vibroakustické vlastnosti*. Zlín, 2008. 93 s . Diplomová práce, UTB Zlín, FT.
- [36] MATOUŠEK, T; PONÍŽIL, P; GALETKA, M. *Struktura a vlastnosti polymerních pěn s otevřenými póry*. Konference PLASTKO, Zlín. 2010.
- [37] Vybavení – přístroje umístěné na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství, FT, UTB ve Zlíně. [online]. [cit. 2010-04-26], dostupné z: <http://www.ft.utb.cz/czech/ufmi/vybaveni.html>

- [38] Měření zvukové pohltivosti materiálů, laboratorní cvičení z Environmentální fyziky. FT, UTB ve Zlíně. [online]. [cit. 2010-04-26], dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_lab_02.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CCD	charged coupled device
A	plocha
M_A	plocha celková
F_r	relativní plocha
D	ekvivalentní průměr
π	Ludolfovo číslo
P_D	průměrná projekce
O	obvod
S_D	povrchová hustota
C	kruhovitost
L	délka
MM	matematická morfologie
N_V, N_A, N_L	reciproké veličiny k veličinám v, v', v''
v	střední objem cely 3D teselace
v'	střední plocha profilu (řezu 3D cely náhodnou rovinou)
v''	střední délka tětiny (řezu 3D cely náhodnou přímkou)
$\mathbf{E} \bullet$	střední odhad veličiny •
s	střední povrch póru
w	střední šířka póru
c, c', c''	konstanty úměrnosti mezi $\mathbf{E}_V, \mathbf{E}_{V'}$ a $\mathbf{E}_{V''}$
CV	variační koeficient
BP	bodový systém
x	souřadnice
V_i	cela Voronoivy teselace

\mathbf{R}^d	d -rozměrný euklidovský prostor
E_+^d	poloprostor ohraničený nadrovinou symetrie
PVT	Poisson-Voronoiova teselace
PE	polyetylen
PP	polypropylen
PS	polystyren
PVC	polyvinylchlorid
EVA	kopolymer etylen vinyl acetátu
PPO-PS	polypropylen oxid se směsí PS
PUR	polyuretan
λ	vlnová délka
T	perioda
c	rychlost zvuku ve vzduchu
f	frekvence
p	akustický tlak
p_0	amplituda akustického tlaku
v	akustická rychlost
u	akustická výchylka
u_0	amplituda akustické výchylky
t	čas
ω	úhlová frekvence
P	akustický výkon
F	síla
S	plocha
α	činitel zvukové pohltivosti

β	činitel zvukové odrazivosti
I	intenzita zvuku
τ	činitel průzvučnosti
ε	činitel přeměny
CT	Computer tomography
EDM	Euklidovská distanční mapa
b_{pq}	hodnota pixelu v EDM
d_{ij}	Euklidovská vzdálenost
C'	konstanta pro výpočet objemu póru
VBA	Visual Basic for applications
.png	portal network graphics
.jpeg	ioint photographic experts group
.bmp	Microsoft windows bitmap

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Schéma obrazové analýzy [11]</i>	14
<i>Obr. 2: Eroze [11]</i>	16
<i>Obr. 3: Originál [11]</i>	16
<i>Obr. 4: Dilatace [11]</i>	16
<i>Obr. 5: Otevření [11]</i>	17
<i>Obr. 6: Zavření [11]</i>	17
<i>Obr. 7: Vyčištění [11]</i>	17
<i>Obr. 8: Vyplnění děr [11]</i>	17
<i>Obr. 9 Růstový model. Čas t roste zleva doprava. Vlevo $t=0$; vpravo $t=\infty$ [20]</i>	21
<i>Obr. 10 Poissonova-Voronoiova teselace [23]</i>	21
<i>Obr. 11 Booksteinův model [23]</i>	22
<i>Obr. 12 Teselace generované shlukovými poly [23]</i>	23
<i>Obr. 13 PUR pěna s otevřenými póry [26]</i>	24
<i>Obr. 14 LDPE pěna s uzavřenými póry [26]</i>	24
<i>Obr. 15 Schéma rozdělení akustické energie při dopadu zvukové vlny na stěnu [34]</i>	30
<i>Obr. 16 Binární obrazová mapa</i>	34
<i>Obr. 17 Výsledek snížení šumu a) je zobrazení originálního části obrázku, b) snížení šumu uvnitř pórů</i>	35
<i>Obr. 18 Grafické znázornění EDM</i>	36
<i>Obr. 19 Zjištěné středy pórů aproximované středy vepsaných kružnic</i>	36
<i>Obr. 20 Voronoiova teselace založená na lokálním maximu EDM (zelená) a původní rovinný řez struktury pěny (bílá)</i>	37
<i>Obr. 21 Vzorek A</i>	39
<i>Obr. 22 Vzorek B</i>	39
<i>Obr. 23 Vzorek C</i>	39
<i>Obr. 24 Vzorek D</i>	39
<i>Obr. 25 Vzorek E</i>	39
<i>Obr. 26 Deformace 4 %</i>	41
<i>Obr. 27 Deformace 7 %</i>	41
<i>Obr. 28 Deformace 14 %</i>	41
<i>Obr. 29 Deformace 18 %</i>	41

<i>Obr. 30 Deformace 29 %</i>	41
<i>Obr. 31 Deformace 36 %</i>	41
<i>Obr. 32 Multianalyzátor Brüel & Kjaer typ 3560-B-030 [37]</i>	48
<i>Obr. 33 Dvoumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer [37]</i>	49
<i>Obr. 34 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření činitele zvukové pohltivosti [38]</i>	49
<i>Obr. 35 Fotografie měřicí aparatury pro měření činitele zvukové pohltivosti [38]</i>	50

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Hustota vzorků</i>	39
<i>Tab. 2 Střední objemy pórů vzorků PUR pěn</i>	47
<i>Tab. 3 Tloušťka vzorků</i>	48

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Závislost velikosti plochy na deformaci</i>	40
<i>Graf 2 Distribuce velikosti pórů vzorku A pro $r=0,37$ mm; $\sigma=0,08$</i>	42
<i>Graf 3 Distribuce velikosti pórů vzorku A pro $r=0,37$ mm; $\sigma=0,08$ metodou počítačové tomografie (CT)</i>	43
<i>Graf 4 Srovnání distribuce velikosti pórů vzorku A metodou počítačové tomografie (CT) a metodou otisku povrchu řezu</i>	43
<i>Graf 5 Distribuce velikosti pórů vzorku B pro $r=0,70$ mm; $\sigma=0,07$</i>	44
<i>Graf 6 Distribuce velikosti pórů vzorku C pro $r=0,38$ mm; $\sigma=0,05$</i>	44
<i>Graf 7 Distribuce velikosti pórů vzorku D pro $r=0,37$ mm; $\sigma=0,10$</i>	45
<i>Graf 8 Distribuce velikosti pórů vzorku E pro $r=0,32$ mm; $\sigma=0,09$</i>	45
<i>Graf 9 Porovnání experimentálně a modelově zjištěných distribucí rovinných řezů pórů.</i>	46
<i>Graf 10 Frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti.....</i>	51
<i>Graf 11 Frekvenční závislost činitele zvukové odrazivosti</i>	51

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: Prostředí programu Tessellation

PŘÍLOHA P II: Příkazy programu Tessellation

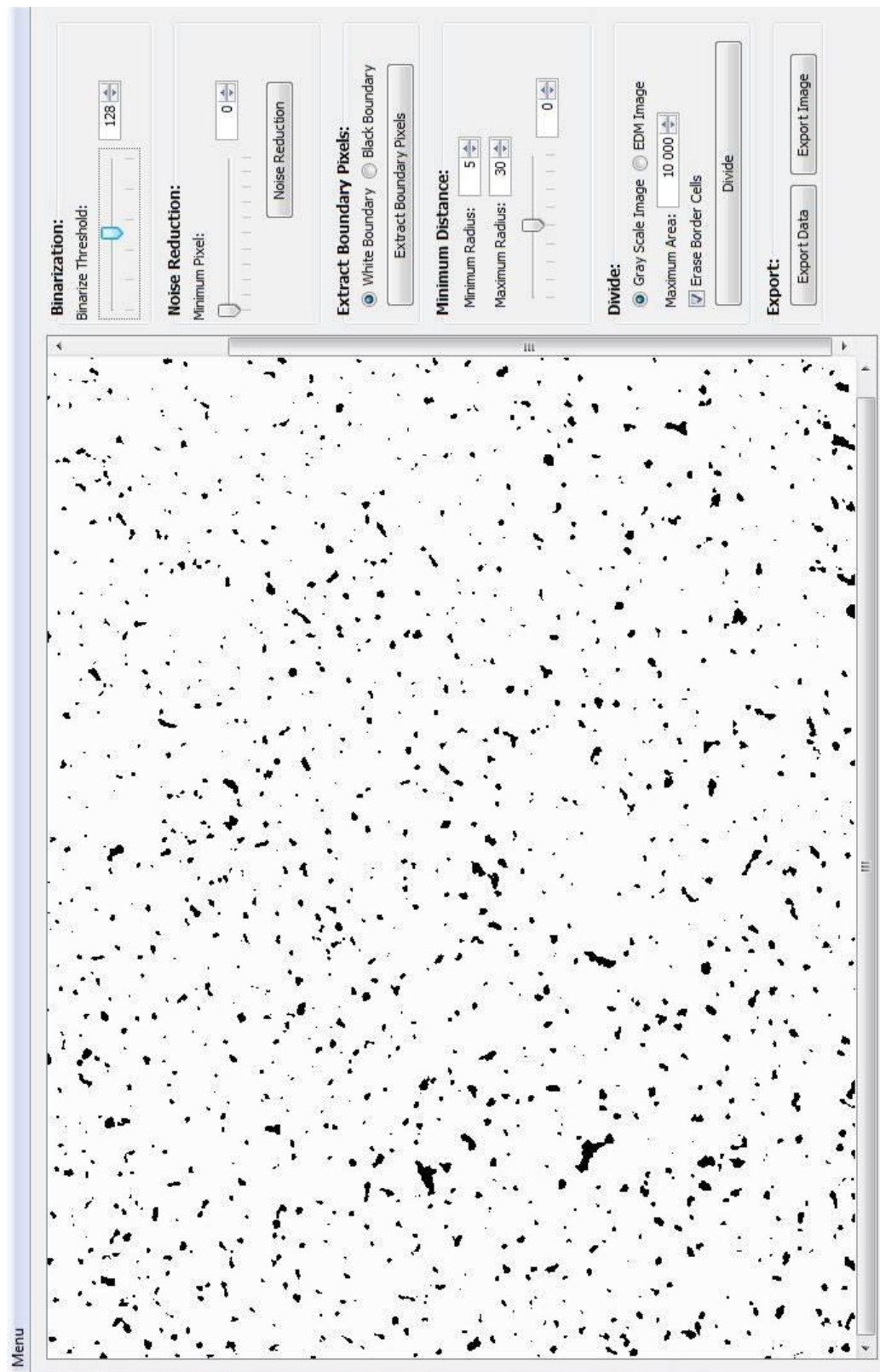
PŘÍLOHA P III: Zpracovaný binární obraz otisku PUR pěny

PŘÍLOHA P IV: Model distribuce v MS Excel

PŘÍLOHA P V: Popis sloupců z přílohy P IV

PŘÍLOHA P VI: VBA kód makra pro model distribuce

PŘÍLOHA P I: PROSTŘEDÍ PROGRAMU TESSELLATION



PŘÍLOHA P II: PŘÍKAZY PROGRAMU TESSELLATION

Binarization

Nastavení prahu v hodnotách od 0 do 255. Bílá barva (hodnota = 0) a černá barva (hodnota =255).

Noise Reduction

Snížení šumu. Zde bylo dobré zbavit se co největšího množství šumu, ale ne za cenu ztráty hranic pórů.

Extract Boundary Pixel

Zvýraznění hranic bodů. Zde byl zvolen Black Boundary jelikož hranice pórů byly v černé barvě.

Minimum Distance

Filtrování minimální vzdálenosti. Byly nastaveny minimální a maximální poloměry a odstraněny poloměry nežádoucí.

Divide

Po nastavení všech parametrů byly rozděleny hranice pórů.

Export Data

Soubor výsledků se uložil jako "*.dat"

Export Image

Obrázek se uložil jako "*.png", "*.jpg/jpeg" nebo "*.bmp"

V další příloze (Příloha P III.) je ukázka zpracovaného binárního obrazu PUR pěny.

PŘÍLOHA P III: ZPRACOVANÝ BINÁRNÍ OBRAZ OTISKU PUR PĚNY

The image shows a software interface for processing a binary image of a porous material. The main window displays a grid of green and red pixels on a black background, representing the processed image. The interface is divided into several control panels:

- Binarization:** Binarize Threshold: 240
- Noise Reduction:** Minimum Pixel: 4
- Extract Boundary Pixels:** White Boundary, Black Boundary
- Minimum Distance:** Minimum Radius: 2, Maximum Radius: 30
- Divide:** Gray Scale Image, EDM Image, Maximum Area: 10 000, Erase Border Cells
- Export:** Export Data, Export Image

Menu

PŘÍLOHA P V: POPIS SLOUPCŮ Z PŘÍLOHY P IV

Sloupec A je náhodným poloměrem koule s gaussovým rozdělením pro vygenerovaný průměr a směrodatnou odchylkou. Pro výpočet byl použit vzorec =gauss(prumer;sigma)

Sloupec B je rovina řezu vygenerovaná náhodným číslem s rovnoměrným rozdělením z intervalu od 0 do průměru + 3σ. Zadaný vzorec byl =uniform(prumer+3*sigma)

Sloupec C je plocha řezu vypočítaná vzorcem =KDYŽ(A2>B2;(A2*A2-B2*B2)*3,1415;-10) na základě poloměru koule a vygenerovanou rovinou řezu. Pokud řez neprochází koulí, tzn. že rovina řezu má větší hodnotu než poloměr koule, byla zvolena teoretická hodnota plochy řezu -10.

Sloupec D představuje experimentální hodnoty velikosti ploch řezu získané z uložených dat zpracované pomocí SW Tessellation. Zde byly seřazeny od nejmenší po největší hodnotu.

Sloupec E a F zaokrouhlí teoretickou a experimentální hodnotu plochy na celou část po kroku 100

Sloupec H je interval velikosti plochy řezu od 0-5700 s krokem po 100, kde např. 0 je rozmezí velikosti plochy řezu 1-99.

Sloupec I vypočítal počet teoretických ploch řezu koule v daném intervalu a **sloupec J** počet experimentálních.

Sloupec K je výpočet rozdílu mezi teoretickým a experimentálním počtem velikosti ploch řezu. První dvě hodnoty rozdílu jsou vynechány úmyslně, jelikož vypočtené hodnoty byly oproti ostatním viditelně odlišné. Navíc v intervalu od 0-200 jsou velikosti ploch řezu natolik malé, že nemusely být programem rozpoznatelné a příliš velký rozdíl by při výpočtu součtu všech rozdílů výsledek hodně ovlivnil.

Ve sloupci P, řádku 1 je součet rozdílu. Tento rozdíl byl nalezen jako nejmenší.

Sloupec M s řádkem 1 a 2 je průměrná hodnota poloměru koule a směrodatné odchylky.

Výsledný průměr a směrodatná odchylka jsou uvedeny v pixelech.

PŘÍLOHA P VI: VBA KÓD MAKRA PRO MODEL DISTRIBUCE

```
Sub vypocet()  
  
    Dim prum, sigm, pom As Double  
    Dim radek, sloupec As Integer  
  
    radek = 1  
    For sloupec = 1 To 10 Step 1  
        Sheets("List1").Select  
        Cells(3, 13).Value = sloupec  
        For prum = 14.7 To 14.8 Step 0.02  
            For sigm = 3.35 To 3.55 Step 0.02  
                pom = Rnd(-1)  
                Randomize (prum * sigm * sloupec + 1)  
                Sheets("List1").Select  
                Cells(1, 13).Value = prum  
                Cells(2, 13).Value = sigm  
                pom = Cells(1, 16).Value  
                Sheets("List2").Select  
                Cells(radek, 1).Value = prum  
                Cells(radek, 2).Value = sigm  
                Cells(radek, sloupec + 2).Value = pom  
                radek = radek + 1  
            Next sigm  
        Next prum  
        radek = 1  
    Next sloupec  
    Sheets("List2").Select  
    Range("C18").Select  
End Sub
```