



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**

**Experimentální analýza procesních podmínek  
pro efektivní mletí cvrččí mouky**

**Experimental analysis of process conditions  
for efficient milling of cricket flour**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2022**

**Jan PIPEK**

**Studijní program:** N0713A270001 Energetika a procesní inženýrství

**Studijní obor:** N071TRPI Procesní inženýrství

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pipek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **473540**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**  
Specializace: **Procesní inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Experimentální analýza provozních podmínek mlýnu pro výrobu cvrččí mouky.**

Název diplomové práce anglicky:

**Experimental analysis of operating conditions of a mill for the production of cricket flour .**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte experimentální studii s cílem navrhnout provozní podmínky vhodné/vhodných dezintegračních jednotky/jednotek pro přípravu mouky ze suchých cvrčků.

- 1) Zpracujte literární, patentovou a průmyslovou rešerši technologií a zařízení pro výrobu cvrččí mouky a zaměřte se zejména na techniky mechanického rozpojování při výrobě cvrččí mouky.
- 2) Formulujte principy mechanického rozpojování a vypracujte přehled vhodných dezintegračních jednotek. Diskutujte jejich charakteristiky, výhody a nevýhody.
- 3) Proveďte systematické experimenty s cílem posoudit vliv provozních podmínek (typ a provozní nastavení mlýnu) při rozpojování cvrčků na kvalitu referenční komerčně dostupné cvrččí mouky.
- 4) Diskutujte výsledky experimentů a uveďte klíčové postřehy, zpracovatelské limity, sledované během experimentů.
- 5) Definujte základní technickou specifikaci pro výběr a nastavení mlýnu pro průmyslové mletí cvrčků na kvalitu referenční mouky včetně zpracovatelských limitů.

Seznam doporučené literatury:

dle pokynů vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **18.09.2022**

doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

**25-04-2022**  
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Experimentální analýza procesních podmínek pro efektivní mletí cvrččí mouky“ vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Lukáše Krátkého, Ph.D. a s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne .....

.....

Jan Pipek

## Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat panu doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D., za vedení, nesmírnou trpělivost a odborné připomínky, které vždy vedly k vytouženému cíli. Dále bych rád poděkoval celému týmu Ústavu procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT.

# Anotační list

**Jméno autora:** Jan

**Příjmení autora:** Pipek

**Název práce česky:** Experimentální analýza procesních podmínek pro efektivní mletí cvrččí mouky

**Název práce anglicky:** Experimental analysis of process conditions for efficient milling of cricket flour

**Rozsah práce:** počet stran: 59  
počet obrázků: 60  
počet tabulek: 11  
počet příloh: 0

**Akademický rok:** 2021/2022

**Jazyk práce:** čeština

**Ústav:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky

**Studijní program:** N0713A270001 Energetika a procesní inženýrství

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

**Konzultant práce:** -

**Zadavatel:** doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

**Anotace česky:** Diplomová práce se zabývá experimentálním posouzením vlivu suché technologie výroby cvrččí mouky na konečnou jemnost produktu v kontrastu s mokrou technologií. Získané procesní podmínky by při potvrzení hypotéz měly přispět k volbě mlecích zařízení do suché technologie. Práce dále analyzuje základní aspekty nutné k posouzení volby technologie pro decentralizovanou malou a střední výrobu cvrččí mouky.

**Anotace anglicky:** The thesis deals with the experimental assessment of the effect of dry technology of cricket flour production on the final fineness of the product in contrast to wet technology. The obtained process conditions, when the hypotheses are confirmed, should contribute to the choice of milling equipment for dry technology. The paper further analyses the basic aspects necessary to assess the choice of technology for decentralized small and medium scale cricket flour production.

**Klíčová slova:** nožový mlýn, ultraodstředivý mlýn, cvrček, cvrččí mouka, velikost částic

**Klíčová slova anglicky:** knife mill, ultra-centrifugal mill, cricket, cricket flour, particle size

**Využití:** K průmyslové aplikaci na budoucí kompletaci potravinářské výrobní linky na menší produkci cvrččí mouky.

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cvrček a cvrččí mouka – teoretický základ práce .....	2
2.1. Cvrček jako surovina.....	2
2.2. Technologie výroby cvrččí mouky.....	10
2.2.1. Mokrý metoda .....	10
2.2.2. Suchá metoda.....	13
2.3. Příklady využití hmyzu pro výrobu potravinářských produktů.....	17
2.4. Mechanické rozpojování cvrčků.....	18
2.4.1. Principy dezintegrace .....	18
2.4.2. Drtiče a mlýny .....	19
2.4.2.1. Mlýny s volně uloženými mlecími tělesy .....	19
2.4.2.2. Mlýny kladkové.....	20
2.4.2.3. Úderové drtiče.....	21
2.4.2.4. Mlýny válcové .....	22
3. Cíl práce.....	23
4. Experimentální měření procesních podmínek dezintegrace .....	24
4.1. Charakteristika suroviny – sušina, velikost .....	24
4.1.1. Stanovení velikosti vstupující částice .....	24
4.1.2. Stanovení celkové sušiny .....	25
4.1.3. Stanovení organické sušiny.....	26
4.2. Testování hypotézy o postupu mletí – prvotní experiment.....	27
4.2.1. Referenční vzorek .....	28
4.2.2. Stanovení hypotézy.....	31
4.2.3. Kulový mlýn.....	32
4.2.4. Nožový + ultraodstředivý mlýn.....	34
4.3. Plán experimentů – popis obecného postupu, použitá zařízení .....	36
4.3.1. Nožový mlýn .....	37
4.3.2. Kombinace nožového a ultraodstředivého mlýnu .....	40
4.3.3. Ultraodstředivý mlýn.....	43
4.3.4. Chyba měření.....	47
4.3.5. Mikroskopická analýza částic .....	48
4.3.6. Energetická náročnost rozpojení .....	50
5. Závěr a výsledky .....	54
6. Bibliografie .....	56

## Seznam obrázků

Obr. 1: Cvrček domácí (Acheta domestica) [2].....	2
Obr. 2: Světová mapa zemí pojidajících cvrčky [10] .....	5
Obr. 3: Schématické znázornění životního cyklu, chovných podmínek a zpracování cvrčka domácího (Acheta domestica) [12] .....	6
Obr. 4: Farma v Keni – Thajský model – podpora projektu ze strany místní univerzity [13] ...	6
Obr. 5: Plně automatizovaná, moderní farma na chov hmyzu [14].....	7
Obr. 6: Mozaika produktů z cvrčka domácího [16] .....	7
Obr. 7: Životní cyklus produktů ze cvrčků a jiného hmyzu [18].....	8
Obr. 8: Efektivita zachování hmoty při chovu cvrčka [18].....	9
Obr. 9: Blokované schéma mokré varianty výroby cvrččího prášku .....	10
Obr. 10: Schématické zobrazení extrudéru, kde je za vysoké vlhkosti a teploty utvářena cvrččí emulze [20].....	11
Obr. 11: CFD schéma sprejového sušení [21] .....	11
Obr. 12: Schéma energetické bilance mokré technologie .....	12
Obr. 13: PFD schéma „mokré“ technologie.....	13
Obr. 14: Blokované schéma suché varianty výroby cvrččího prášku.....	14
Obr. 15: Experimentální linka na mikrovlnné sušení Shandong Agricultural University [25] ..	14
Obr. 16: Mlýn Pulvocron PCS 20 od společnosti Bepex [27].....	15
Obr. 17: Schéma energetické bilance suché technologie .....	16
Obr. 18: PFD schéma „suché“ technologie .....	16
Obr. 19: Vhodné principy rozpojování částic a – ořez, b – rozbíjení, c – smyk, d – stříh [32] .	19
Obr. 20: Pohyb mlecích tělísek se vzrůstající rychlostí (zleva doprava) v rotujícím rozpojovacím bubnu [35] .....	20
Obr. 21: Princip fungování kladkového mlýnu [34].....	20
Obr. 22: Schématické vyobrazení úderového mlýnu [36].....	21
Obr. 23: Průřez kontinuálním ultraodstředivým mlýnem [37].....	21
Obr. 24: Schématické vyobrazení válcového mlýnu [37].....	22
Obr. 25: Vzorčky měřených cvrčků.....	24
Obr. 26: Model cvrčka nahrazený hranolem [38] .....	24
Obr. 27: Sušení první várky cvrčků v komorové sušárně .....	25
Obr. 28: Popelovina cvrčka domácího po žíhání.....	26
Obr. 29: Proteinový prášek na vaření a pečení [40].....	28
Obr. 30: Vibrační stroj JBS IVEX, VP 200.....	28
Obr. 31: Schématické zobrazení principu síťové analýzy.....	29



Obr. 32: Křivka kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti referenčního vzorku se zobrazenou hodnotou $D_{50}$ .....	30
Obr. 33: Vize hledání správné konfigurace laboratorních zařízení .....	31
Obr. 34: Vzorek číslo 1,2,3 po konci mletí .....	33
Obr. 35: Mletí v keramickém mlýnu .....	33
Obr. 36: Přehled mlecích tělísek.....	34
Obr. 37: Zapojení sestavy nožového mlýnu.....	35
Obr. 38: První vzorky cvrččí mouky při různých podmínkách mletí .....	36
Obr. 39: Schématické uspořádání procesů mletí na nožovém a ultraodstředivém mlýně.....	37
Obr. 40: Konfigurace nožového mlýna Retsch SM 300 [42].....	38
Obr. 41: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti limitních stavů nožového mlýnu .....	38
Obr. 42: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti limitních stavů nožového mlýnu a referenčního vzorku .....	39
Obr. 43: Schéma měření pro zpřesnění hypotézy mletí.....	40
Obr. 44: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti pro kombinaci mlýnů s počáteční hodnotou $1\ 000\ \text{min}^{-1}$ .....	41
Obr. 45 Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti pro kombinaci mlýnů s počáteční hodnotou $3\ 000\ \text{min}^{-1}$ .....	42
Obr. 46: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti nejjemnějších nastavení z kombinace mlýnů a referenčního vzorku.....	43
Obr. 47: Konfigurace ultraodstředivého mlýnu Retsch ZM 200 .....	44
Obr. 48: Ultraodstředivý mlýn Retsch ZM 200 po skončení mletí.....	44
Obr. 49: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti obou pokusů mletí na ultraodstředivém mlýně při $10\ 000\ \text{min}^{-1}$ .....	45
Obr. 50: Kumulativní křivky rozložení velikosti částic dle hmotnosti obou pokusů mletí na ultraodstředivém mlýně a referenčního vzorku .....	46
Obr. 51: Chybové úsečky ve formě směrodatné odchylky kombinace mlýnů za stejných podmínek .....	47
Obr. 52: Detailní záběr na optickou čočku SP 10/0.25; 160/0.17 a nastavení mikroskopu Olympus LEXT OSL 3000 .....	48
Obr. 53: Zleva křídlo a část krunýře, nožička, jemné částice referenčního vzorku od společnosti SENS (větší přiblížení) .....	48
Obr. 54: Přehled rozmanitosti tvarů z mikroskopické analýzy .....	49
Obr. 55: Schéma měření výkonu .....	50
Obr. 56: Zapojení přístroje Fluke 438 II s počátečními podmínkami měření .....	50
Obr. 57: Obrazovky záznamníku a nastavení měřených podmínek přístroje Fluke 438 II .....	51

Obr. 58: Energetická náročnost rozpojení nožového mlýnu .....	51
Obr. 59: Energetická náročnost rozpojení částic na ultraodstředivém mlýnu po průchodu mlýnem nožovým .....	51
Obr. 60: Energetická náročnost rozpojení částic na ultraodstředivém mlýnu při přímém průchodu cvrčka domácího .....	52

## Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled nutričních hodnot standardně chovaných jedlých druhů cvrčků [3] [4] .....	3
Tab. 2: Přehled minerálů standardně chovaných jedlých druhů cvrčků (mg/100 g) [3] [9] .....	4
Tab. 3: Tabulka průměrných hodnot velikosti zpracovávaných cvrčků domácích .....	24
Tab. 4: Tabulka naměřených dat celkové sušiny .....	26
Tab. 5: Tabulka naměřených dat organické sušiny .....	27
Tab. 6: Základní hodnoty referenčního vzorku .....	31
Tab. 7: Srovnání hlavních parametrů daných vzorků .....	39
Tab. 8: Srovnání parametrů daných vzorků .....	41
Tab. 9: Srovnání percentile daných vzorků .....	42
Tab. 10: Srovnání percentile daných vzorků .....	46
Tab. 11: Tabulka energií jednotlivých způsobů mletí .....	53

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$D_{10}$	[mm]	Velikost částic v kumulativním hmotnostním podílu 10 hm. %
$D_{50}$	[mm]	Velikost částic v kumulativním hmotnostním podílu 50 hm. %
$D_{90}$	[mm]	Velikost částic v kumulativním hmotnostním podílu 90 hm. %
$\bar{D}$	[mm]	Střední velikost v kumulativním hmotnostním podílu
$D_B$	[mm]	Průměr bubnu mlýna
$D_p$	[mm]	Charakteristická velikost částic
$E$	[J]	Elektrická energie
$E_{\text{naprázdno}}$	[J]	Elektrická energie naprázdno
$E_{\text{rozpojovací}}$	[J]	Elektrická energie rozpojování
$F$	[–]	Kumulativní křivka rozložení velikosti částic
$m_{\text{čerstvých cvrčků}}$	[g]	Hmotnost čerstvých cvrčků
$m_{\text{předsušených cvrčků}}$	[g]	Hmotnost předsušených cvrčků
$m_{\text{usušených cvrčků}}$	[g]	Hmotnost usušených cvrčků
$m_{\text{žíhaných cvrčků}}$	[g]	Hmotnost žíhaných cvrčků
$n$	[–]	Index polydisperzity
$n_p$	[ $\text{min}^{-1}$ ]	Pracovní otáčky bubnového mlýna
$p$	[W]	Okamžitý výkon
$p_{\text{naprázdno}}$	[W]	Okamžitý výkon naprázdno
$P$	[W]	Celkový výkon
$T$	[s]	Doba jedné periody
$TH$	[hm. %]	Vlhkost
$TS$	[hm. %]	Sušina
$VS$	[hm. %]	Organická sušina

## 1. Úvod

S postupně se zvyšující lidskou populací na Zemi dochází k prohlubování potravinové krize, úbytku místa, růstu cen potravin, růstu CO<sub>2</sub> a nedostatku pitné vody aj. Což je důvodem vzrůstající poptávky po nových způsobech chovu, urychlení pěstování stávajících zdrojů a také hledání zdrojů nových. Možným řešením může být chov a zpracování cvrčka domácího (*Acheta domesticus*). Mezi známými alternativami vyniká právě nízkou náročností na zastavěný prostor, nízkou produkcí CO<sub>2</sub>, velmi nízkou spotřebou vody a potravy, při zachování stejného obsahu bílkoviny ve srovnání s běžnou masnou stravou. Další výhodou je jeho humánní sklizení, protože díky jednoduché nervové soustavě cvrček netrpí.

Cvrčka lze zpracovávat buď suchou nebo mokrou technologií. Cílem této práce je posoudit kvalitu výsledného produktu zpracovaného suchou cestou, která je vhodnější pro malochovy a střední výroby.

Díky tomu bude možné nalézt vhodné nastavení provozních parametrů, jako jsou otáčky mlýnu a velikost otvorů sít, při výrobě cvrččí mouky. Ta je esenciálním produktem právě ze zpracovávaného cvrčka, který je možné využít ve výrobě běžných potravinářských produktů, vedoucích ke zvýšení jejich nutričních kvalit. Touto kombinací je možné obohacovat potraviny s nízkou přidanou hodnotou a cenou a dělat z nich tak kvalitnější potraviny, které mohou být substitutem za daleko dražší a hůře dostupné produkty. Zároveň hledá technologii, která bude svou kvalitou konkurence schopná vůči masovým průmyslovým linkám a bude možné ji využít v decentralizovaných malých a středních výrobcích. Ty mohou být klíčovým hráčem při zvedání kvality stravy v zemích třetího světa.

Legislativně se jedná tzv. o potraviny nového typu (PNT), které byly v právním systému přijaty v roce 2018. Je to reakce na světovou poptávku po zdravějších a ekologicky udržitelnějších potravinách. K výrobkům z hmyzu se přistoupilo především proto, že jejich ekologická zátěž ve srovnání s tradičními zdroji bílkovin, jako jsou všechny masné výrobky, je téměř zanedbatelná. Na základě výše zmíněných důvodů to je jeden z možných bílkovinných doplňků budoucnosti. V posledních letech se produkty z cvrččí mouky začaly pravidelně objevovat i v českých obchodech. Zároveň právě cvrčci mohou vyřešit nedostatek kvalitních potravin v Africe a jiných zemích třetího světa. Při zvládnutém průmyslovém zpracování a dosažení snížení produkčních cen jsou ideální volbou pro africký trh, nehledě na to, že více jak polovina afrických zemí je zvyklá na konzumaci hmyzu. Správná optimalizace výrobních procesů je tedy inženýrský „oříšek“, jehož vyřešení může přinést spoustu pozitivních změn a mít přesah v podobě záchrany lidského života.

## 2. Cvrček a cvrččí mouka – teoretický základ práce

### 2.1. Cvrček jako surovina

Cvrček domácí (*Acheta domesticus*) je hojně rozšířený zástupce rovnokřídlého hmyzu, který se vyskytuje především v lidské společnosti. Pohlavní diverzita je viditelná především díky kladélku u samiček a drsnému vroubkování na křídlech samců, díky kterému jsou schopni vytvářet „cvrkavé“ zvuky. Tento druh cvrčka dorůstá velikosti od 16–20 mm a je pro něho typické žluto – hnědé zbarvení, kdy podklad je světle žlutý s nápadně hnědou kresbou. Pro svůj život vyhledává místa s teplotou vzduchu nad 28 °C a vysokým indexem vlhkosti vzduchu. Jeho typickým místem výskytu jsou pekárny, sklepy domů, továrny a další [1].



*Obr. 1: Cvrček domácí (Acheta domesticus) [2]*

Tělo cvrčka je štíhlé, podlouhlé s kruhovým průřezem, má silné zadní nohy a dlouhá tykadla. Na konci zadečku jsou dva štěty. Kostrou je vnější exoskelet s vysokým obsahem chitinu, vápníku a dalších složek [1]. Tělo cvrčka je plné vitamínů a minerálů, které přispívají ke zdravému fungování lidského těla. Jsou to minerály jako vápník, draslík, hořčík, fosfor, sodík, železo a zinek. Z pohledu nutričních hodnot je jedním z nejdůležitějších ukazatelů množství bílkovin na 100 g, dále obsah tuků, vlákniny a sacharidů [3].

V Tab. 1 je přehled všech po světě rozšířených druhů cvrčků. Jedná se o porovnání nutričních charakteristik jednotlivých druhů jedlého hmyzu a běžně rozšířených masných produktů (prasete, krávy, kuřete či kozy). Při mezidruhovém srovnávání cvrčků vychází cvrček domácí na předních místech, co se obsahu bílkovin týká. Při porovnávání s běžně dostupným masem má cvrček téměř třikrát větší obsah bílkovin. Tuk se u cvrčků vyskytuje ve dvou formách, a to jako triglycerid, který má větší zastoupení (80 hm. %) a poté fosfolipidy (20

hm.%). V případě posuzování objemu tuků představují asi třetinu hmotnosti u dospělých cvrčků. Dalším nezanedbatelným parametrem je vláknina, která je u rovnokřídlých obsažena především v jejich exoskeletu společně s chitinem, který hraje významnou roli při metabolických procesech, a dokonce je dobrou prevencí proti tumoru. Chitin však pro obyvatele ze západních zemí může být hůře stravitelný, proto je důležité ho v produktech ze cvrčků minimalizovat, případně úplně odstranit. Mimo jiné jsou cvrčci také bohatým zdrojem aminokyselin [3].

Tab. 1: Přehled nutričních hodnot standardně chovaných jedlých druhů cvrčků [3] [4]

Druh cvrčka	Vývojová fáze	Bílkoviny (g/100g sušiny)	Tuky (g/100g sušiny)	Vláknina (g/100g sušiny)	Minerály (g/100g sušiny)	Sacharidy (g/100g sušiny)	Energetická hodnota (kcal/100g sušiny)
Acheta domesticus	Dospělec	66,75	16,3	10,2	7,1	-	455,19
Gryllus assimillis	Dospělec	57,05	23,15	8,28	6,4	12,53	397,85
Brachytrupes membranaceus	Dospělec	53,48	15,91	6,37	6,06	15,21	455,82
Brachytrupes portentosus	Dospělec	48,81	20,9	11,62	13,45	-	112,06
Gryllotalpa africana	Dospělec	22,43	11,42	7,52	13,08	47,36	363,47
<b>Zvířecí tkáň</b>							
Hovězí	Dospělec	59,91	18,42	0	-	0	-
Kozí	Dospělec	27	3	0	-	0	143
Broiler	Dospělec	24	14	0	-	0	165
Vepřové	Dospělec	27	6	0	-	1,5	242

\*Tabulka obsahuje střední hodnoty vybraných zvířecích druhů

V Tab. 2 je názorně zobrazeno zastoupení jednotlivých minerálních látek v těle vybraných druhů cvrčků a běžně chovaných druhů masné zvěře. Ty jsou porovnány s doporučenými denními dávkami příjmu dospělého a dítěte. Řádek s využívaným druhem hmyzu, tedy cvrčkem domácím, je barevně odlišen s ohledem k doporučené denní dávce. Červené hodnoty symbolizují překročení denní dávky, žluté krajní mez a zelené hodnotu splňující povolené množství. Je možné vidět kritickou hodnotu v obsahu fosforu a zinku. Ta může být do značné míry ovlivněna stravou a způsobem chovu cvrčka domácího. Mnohé zdroje uvádí, že při dodržení vyvážené stravy není možné, aby se konzument se zdravými ledvinami předávkoval fosforem [5]. Na druhé straně předávkování zinkem může mít zásadní vliv na lidský organismus. Některé zdroje uvádí, že maximální denní dávkou je 10 mg/den, jiné až 50 mg/den [6] [7]. Je proto nezbytné dbát zvýšené opatrnosti při chovu hmyzu obecně a nutná je dostatečná finální kontrola výsledného produktu. Není však třeba se nijak zásadně

znepokojoval, maximální denní dávkou, kdy dochází k akutním stavům, je až hodnota 150 až 250 mg/den v závislosti na druhu zinku a toleranci lidského organismu [8]. To může být i důvodem, proč jeho obsah není uváděn na běžně dostupných produktech z cvrčka domácího. Navíc zinek je jedním z esenciálních mikro-prvků, které jsou nezbytné ke správnému fungování lidského organismu.

Tab. 2: Přehled minerálů standartně chovaných jedlých druhů cvrčků (mg/100 g) [3] [9]

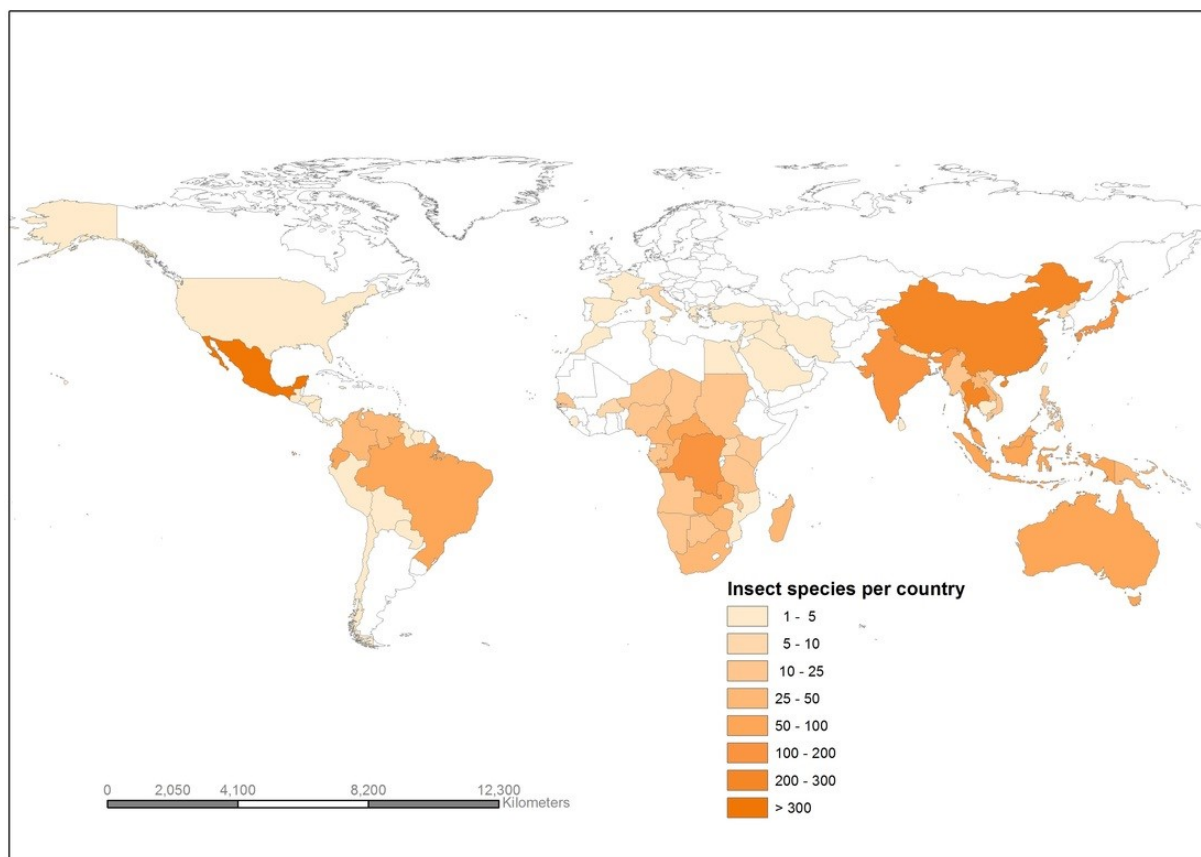
Druh cvrčka	Fosfor	Draslík	Sodík	Vápník	Hořčík	Zinek	Mangan	Železo	Měď
	(mg/100 g)								
Gryllus bimaculatus	1169,6	1079,9	452,99	240,17	143,65	22,53	10,36	9,66	4,55
Acheta domestica	823,9	126,62	435,06	171,07	94,71	20,22	3,35	8,75	1,43
Teleogryllus ema	1085,4	895,5	278,23	193,54	152,48	18,47	5,86	10,75	2,19
Gryllus assimillia	0,8	-	0,99	47,55	3,92	5,35	1,46	2,92	0,68
Brachytrupes membranaceus	126,9	-	-	9,21	0,13	-	-	0,68	-
<b>Zvířecí tkáň</b>									
Hovězí	-	-	-	5,43	49,33	5,53	0,04	3,31	0,45
Kozí	-	240,22	69,17	12,35	21,41	-	-	-	-
Brojler	407	248	46	5,8	29	1	-	0,55	0,07
Vepřové	271,5	405	61	4,15	23,55	4,65	-	10,2	1,4
<b>Doporučené hodnoty příjmu (mg/den)</b>									
Dítě	100	-	-	300	26	2,8	0,003	11,6	-
Dospělec	700	2000	500	1300	260	7,2	230	27,4	1,5

\*Barvy symbolizují škálu, jak se daný prvek blíží doporučenému dennímu příjmu (červená – překročení hodnoty, žlutá – hraniční hodnoty a zelená – hodnoty v mezích)

\*Tabulka obsahuje střední hodnoty vybraných zvířecích druhů

V celosvětovém měřítku jsou cvrčci konzumováni v téměř 50 zemích světa ve velké druhové rozmanitosti, a to přes 60 druhů. V kontinentálním srovnání je na prvním místě Afrika (25 zemí), následuje Asie (13 zemí), poté Amerika (5 zemí), Evropa (4 země) a poslední Austrálie (2 země). Na obrázku číslo 4 je mapa světa se znázorněnými trhy, kde se pojidají cvrčci ať už samotní nebo zpracováni v potravinářských produktech [3].

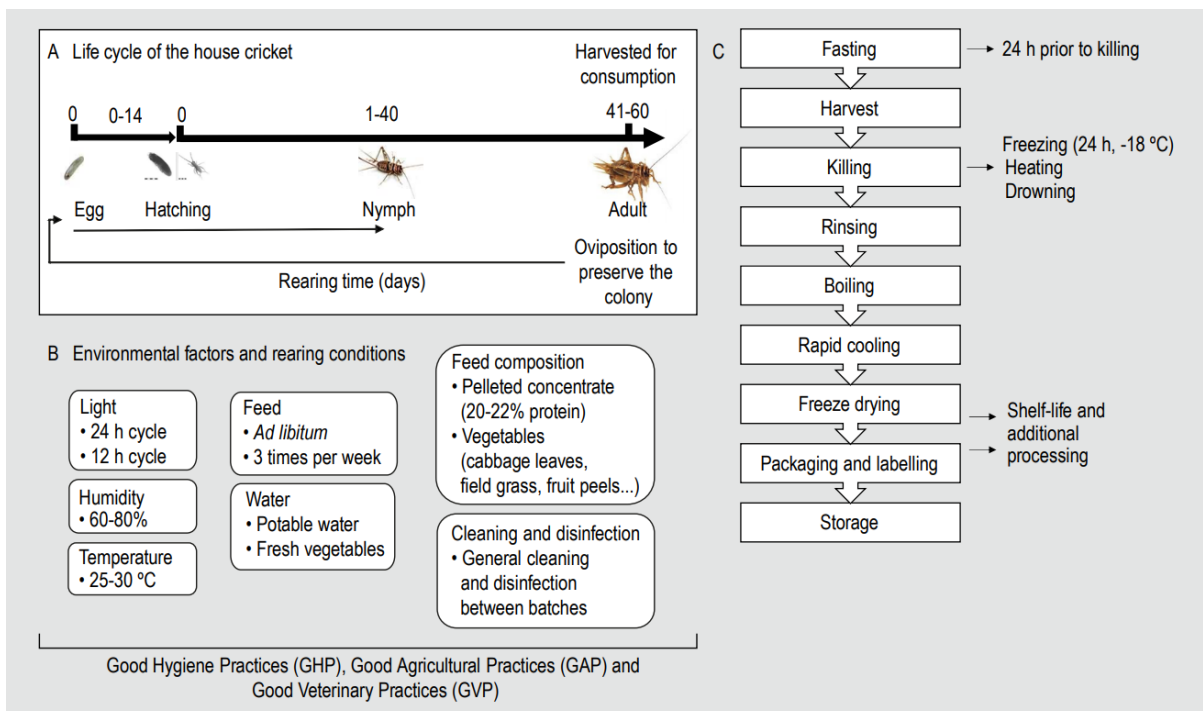




Obr. 2: Světová mapa zemí pojídajících cvrčky [10]

Chov je obvykle rozdělen do několika částí, líhně pro mláďata, část s dospívajícími jedinci, a nakonec zpracovatelskou a produkční část. Životní cyklus začíná rozmnožováním, kdy se v bedně s oběma pohlavími zvýší teplota nad 28 °C. Pod nižší teplotou se cvrček domácí není schopen rozmnožovat. V takovýchto podmínkách se daná generace nechá v rozmezí 5 až 7 dní, poté se z krabice vyjme miska s kokosovou kůrou, kam samičky nakladly vajíčka, a dospělci pokračují k dalšímu zpracování. Inkubace vajíček trvá mezi 7 a 10 dny. Po vylíhnutí se celá generace cvrčků přesune do krabice, která je napojena na vodu, a je pravidelně vykrmována. Během životního cyklu se krmí především granulátem a poslední dny (2-3) před sklizní čerstvou zeleninou a ovocem, která díky rychlému metabolismu hmyzu přispívá k uspokojivé chuti výsledného produktu. Nakonec jsou cvrčci uvedeni do hibernace, kdy se sníží teplota pod 0 °C, zpravidla prováděné v mrazicích boxech. Následně jsou usmrceni převařením, kdy se z hmyzu zároveň dostávají hrubé, ve vodě rozpustné nečistoty. Tento způsob je vzhledem k legislativě Evropské unie plně humánní. Celý životní cyklus trvá 4 až 5 týdnů, dá se tedy během roku stihnout až 11 sklizní po 33 dnech, pokud je celá výroba dobře organizovaná. Je pravidlem, že ať už velké chovy či mikro-farmy, chovají hmyz generačně. To znamená, že v jeden čas mají v chovu více generací, které postupně dorůstají a zaručují tak kontinuální sklizeň bez prodlevy v dodávkách [11].





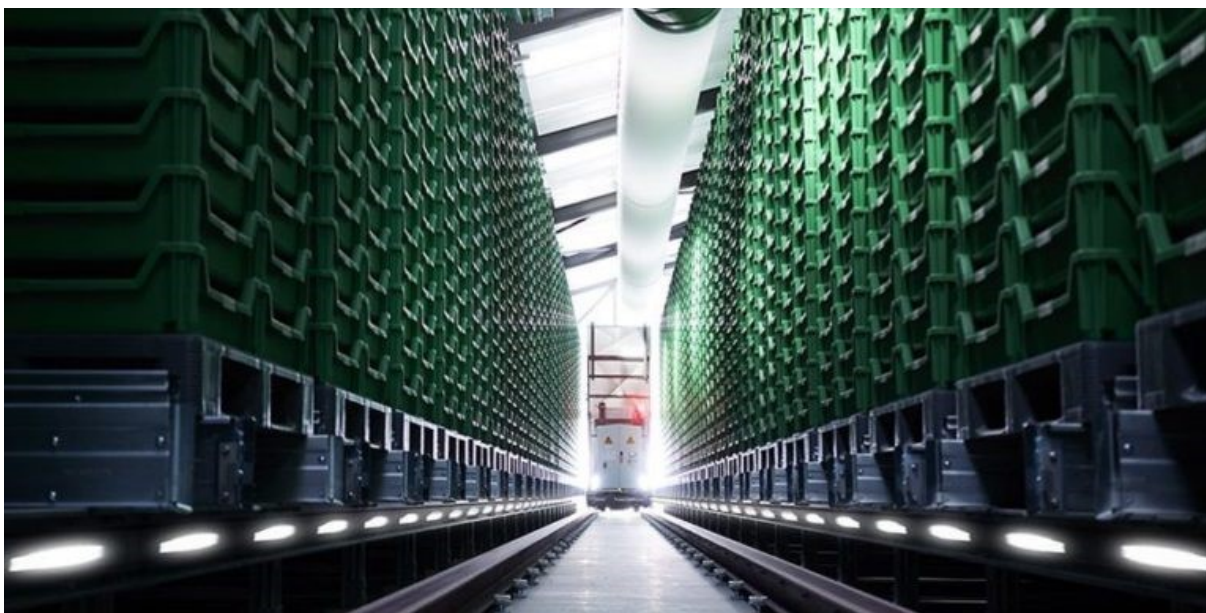
Obr. 3: Schématické znázornění životního cyklu, chovných podmínek a zpracování cvrčka domácího (*Acheta domesticus*) [12]



Obr. 4: Farma v Keni – Thajský model – podpora projektu ze strany místní univerzity [13]

Na světě zatím existují dva základní modely chovu cvrčků. Jedním je tzv. Thajský (asijský) model, kdy jsou chovy spíše rodinnou záležitostí, produkce se pohybuje ve stovkách kilogramů ročně a jednotlivé chovné kóje pro cvrčky nejsou vrstveny do více pater. Těchto decentralizovaných farem je tedy mnoho na malém území. Na druhou stranu model západních

zemí je typický automatizovanou velkovýrobou, kdy jsou jednotlivé chovné kóje umístěny v mnoha patrech nad sebou ve velkých skladech [11].



Obr. 5: Plně automatizovaná, moderní farma na chov hmyzu [14]

Cvrčci se dají obchodovat dvěma způsoby, a to buď jako prémiová krmná směs pro zvířata, která zajišťuje rychlejší růst a pestřejší stravu. Toho se využívá především ve velkých chovech ryb, kuřat a domácích mazlíčků [3]. Francouzská společnost Ynsect dokonce získala kontrakt v hodnotě 100 milionu dolarů na výrobu krmných směsí pro lososy, kdy bylo zjištěno, že při krmení ryb právě cvrčky dochází k rychlejšímu růstu, ryby jsou zdravější a odolnější ve srovnání s jinými druhy potravy [15].

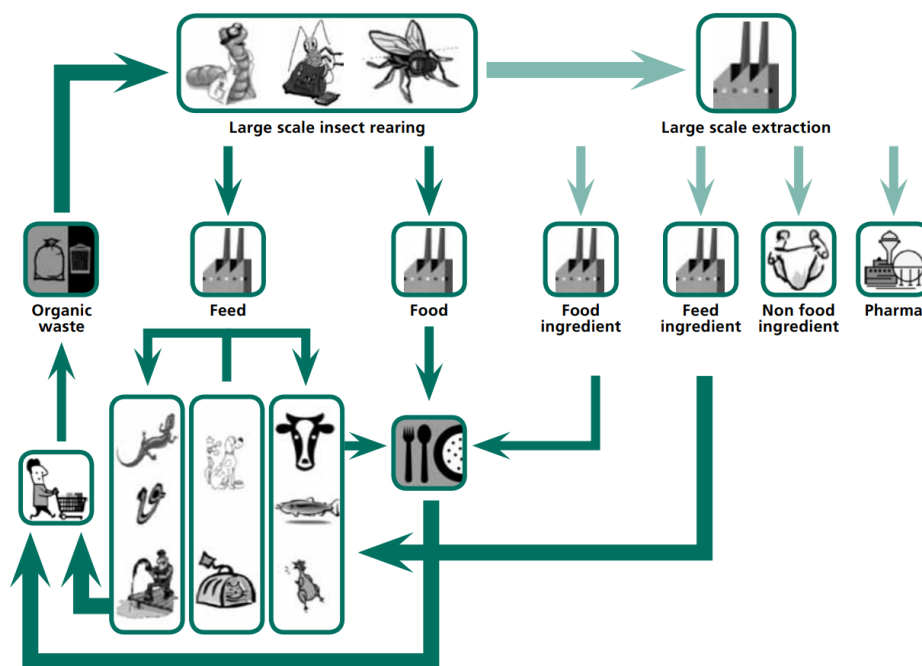


Obr. 6: Mozaika produktů z cvrčka domácího [16]



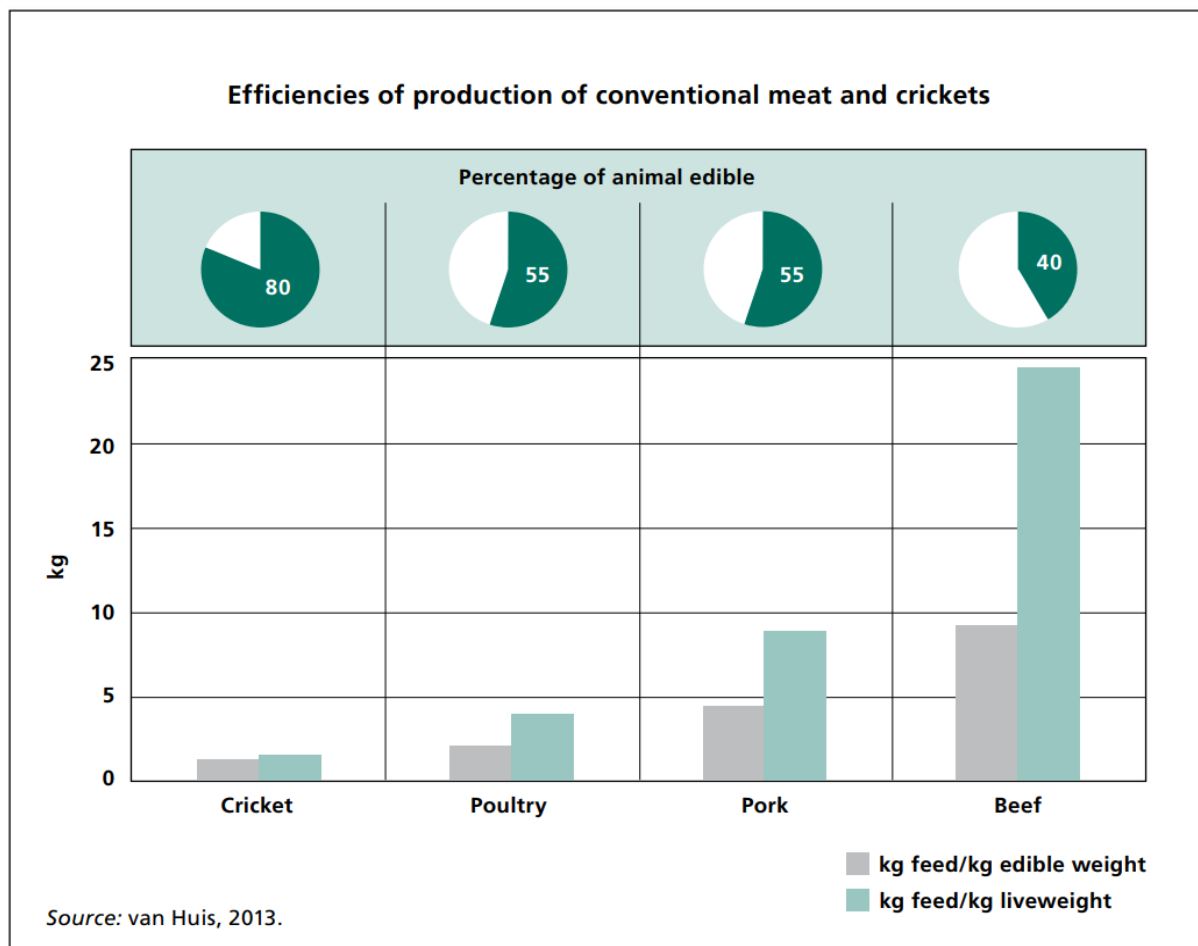
Druhou možností je prodej cvrčků lidským konzumentům. V Evropské unii byl prodej hmyzu označen jako potravinová novinka (PNT) a legalizován v roce 2018 [17]. Velmi rozšířený je prodej vakuově baleného opraženého hmyzu s různými příchutěmi. Druhou rozšířenější variantou je výroba cvrččího prášku, respektive mouky, která nachází daleko širší uplatnění. Je možné ji přidávat do širokého spektra výrobků jako jsou těstoviny, kaše, chléb, při zdravém pečení nebo jako přísada do různých druhů omáček. Některé společnosti přidávají cvrčky dokonce do cukrovinek jako jsou lízátko atd. Mouka nachází uplatnění i ve sportovní výživě, kde je přidávána díky svému vysokému obsahu bílkovin do proteinových tyčinek. Některé společnosti z ní vyrábí i proteinové koktejly především díky dobré vstřebatelnosti a nízké metabolické zátěži pro tělo samotné. Dnes už lze prášek užívat i v podobě potahovaných tablet pro vysoký obsah vitamínů obsažených v těle hmyzu [11].

Cvrček a produkty z něho vyrobené jsou ideální součástí, která zapadá do globálního puzzle cirkulární ekonomie. Celý obnovitelný řetězec začíná u krmiva, respektive granulí, vyrobených ze zpracovaného bioodpadu nebo ovoce, následně použitého ke zkrmení hmyzem. Zpracovaný cvrček je distribuován skrze retailový řetězec přímo k zákazníkovi, anebo do průmyslových odvětví (např. farmacie, výzkumu a vývoji v oblasti kompozitních materiálů, zpracovatelského průmyslu, biomasa, biopalivo nebo krmivo pro chovnou zvěř). To vše se bez ohledu na délku cesty dostává ke koncovému zákazníkovi, který daný produkt spotřebuje anebo ho po vypršení lhůty životnosti vyhodí. Protože jde o odpad organického původu, lze z něho opět vyrobit krmivo pro novou generaci cvrčků, nebo jej zpracovat jako biomasu nebo biopalivo. Celý cyklus se opakuje tak, jak je vyobrazeno na Obr. 7 [18].



Obr. 7: Životní cyklus produktů ze cvrčků a jiného hmyzu [18]

Další nezanedbatelnou výhodou je poměr tělesné hmoty cvrčka ku hmotnosti potravy spotřebované na jeho chov. Tento poměr je zobrazen na Obr. 8, kde je porovnán s hodnotou ostatních běžně dostupných druhů masa na evropském trhu [18].



Obr. 8: Efektivita zachování hmoty při chovu cvrčka [18]

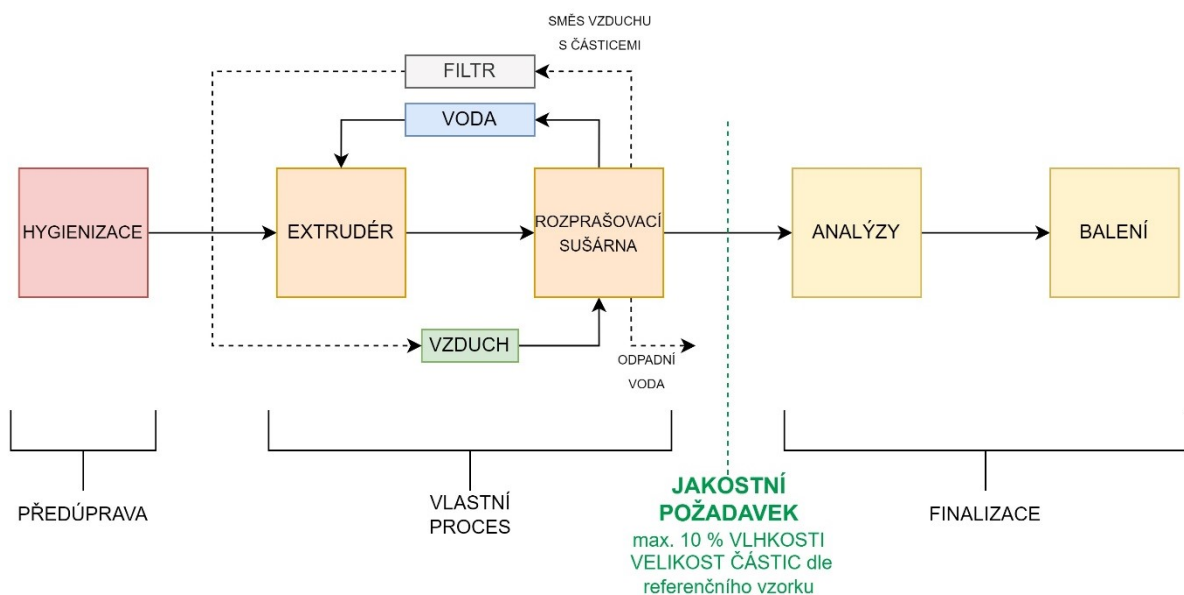
V neposlední řadě je třeba popsat, jaký charakter má mouka. Tím jsou myšleny především požadavky na vlhkost, složení, velikost částic a mechanické vlastnosti. V publikaci z finské univerzity jsou uvedeny následující hodnoty jako vhodné pro potravinářské účely, vlhkost pro mouku 10 hm. % a velikost částic v rozsahu 0,04 – 0,15 mm. Produkty takovéto kvality by měly mít optimální vlastnost jak z pohledu mikrobiálního a enzymatického, tak z pohledu oxidace tuků [19].

## 2.2. Technologie výroby cvrččí mouky

Technologické zpracování cvrčka domácího do podoby prášku může mít mnoho podob, a právě technologie výroby je jednou z největších překážek, které brání tomu, aby se cvrččí produkty staly oblíbenou pochoutkou v západních zemích. Dnešním největším problémem je především nadměrná cena za produkty z cvrččí mouky a jedině díky efektivnějšímu a výkonnějšímu zpracování může být tohoto cíle dosaženo. Řešení této problematiky je také jedním z hlavních cílů této práce. Dále budou rozvedeny dvě současně nejrozšířenější technologie zpracování, a to mokrá a suchá cesta.

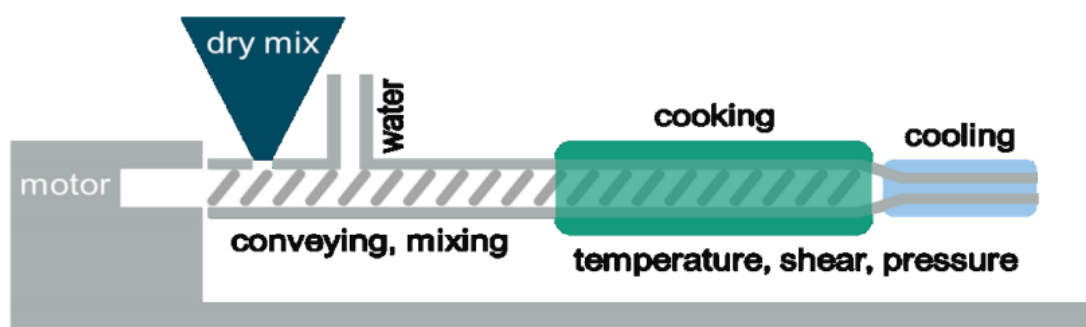
### 2.2.1. Mokrý metoda

Prvním velmi rozšířeným procesem zpracování cvrččí moučky je tzv. mokrá metoda, kdy je do systému vnášena hygienicky ošetřená směs cvrčků společně s vodou. Ta probíhá pomocí vaření tělíček po dobu 10 a více minut. Jsou možné i jiné postupy, kdy se kombinuje vaření (po kratší časový úsek) a prudké chlazení [12]. Celý proces je zobrazen na Obr. 9.



Obr. 9: Blokové schéma mokré variant výroby cvrččího prášku

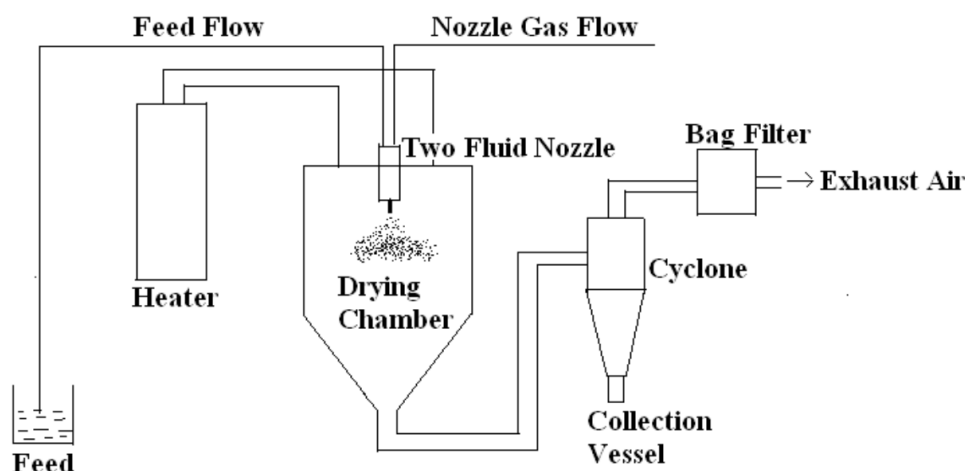
Tato směs je následně unášena pohyblivým šroubem extrudéru, kde je za působení rotačně posuvného pohybu míchána ve směs a unášena jednotlivými zónami, kde postupně dochází k růstu teplot a tlaku a směs je přetvářena do homogenní, kompaktní suspenze. Ta je na konci zařízení vtlačována do hlavy, kde je chlazená na pracovní teplotu a potrubím vedena do rozprašovací sušárny [20].



Obr. 10: Schématické zobrazení extrudéru, kde je za vysoké vlhkosti a teploty utvářena cvrččí emulze [20]

Rozprašovací sušička funguje na principu přívodu kapalné směsi do hlavní pracovní komory společně s ohřátým vzduchem. Na vstupu je směs rozprašována pomocí trysek atomizéru nebo rotujícího disku s lopatkami do okolí na mikroskopické kapičky. Ty jsou díky své malé hmotnosti a vysoké teplotě proudícího vzduchu (které zvyšuje součinitel přestupu tepla) rychle sušeny. Kapička je na své trajektorii postupně zbavena veškeré vlhkosti a na stěnu zařízení, tak dopadá hmota v podobě sušiny. Proces pozorovaný v sušárně je možno přirovnat k mlžnému mraku, kdy je ve vzduchu vysoká vlhkost odpařovaná z kapiček a velké množství suchých částic. Tento prášek je následně nasán do cyklónu, kde je pomocí odstředivých sil vytržena potřebná velikost zrn, která se v dalším kroku shromažďují v zásobníku [21].

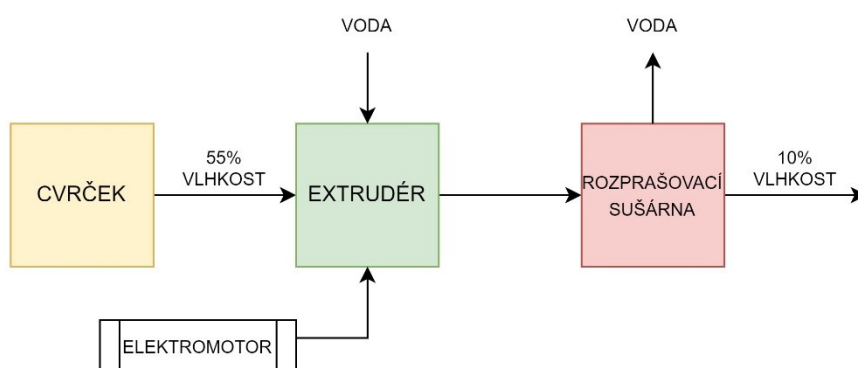
Ve srovnání s jinými konvektivními druhy sušení je výsledná doba procesu velmi krátká, a to v řádů sekund. Z tohoto důvodu jsou rozprašovací sušárny v poslední době velmi žádané v potravinářském průmyslu, protože během sušení nedojde k výraznému poškození zpracovávaného produktu a ani ke znehodnocení. Nejčastěji se této metody využívá k sušení materiálů jako je mléko, kakao, káva (instantní), prací prášky, barviva, léčiva, čaj aj. [22].



Obr. 11: CFD schéma sprejového sušení [21]

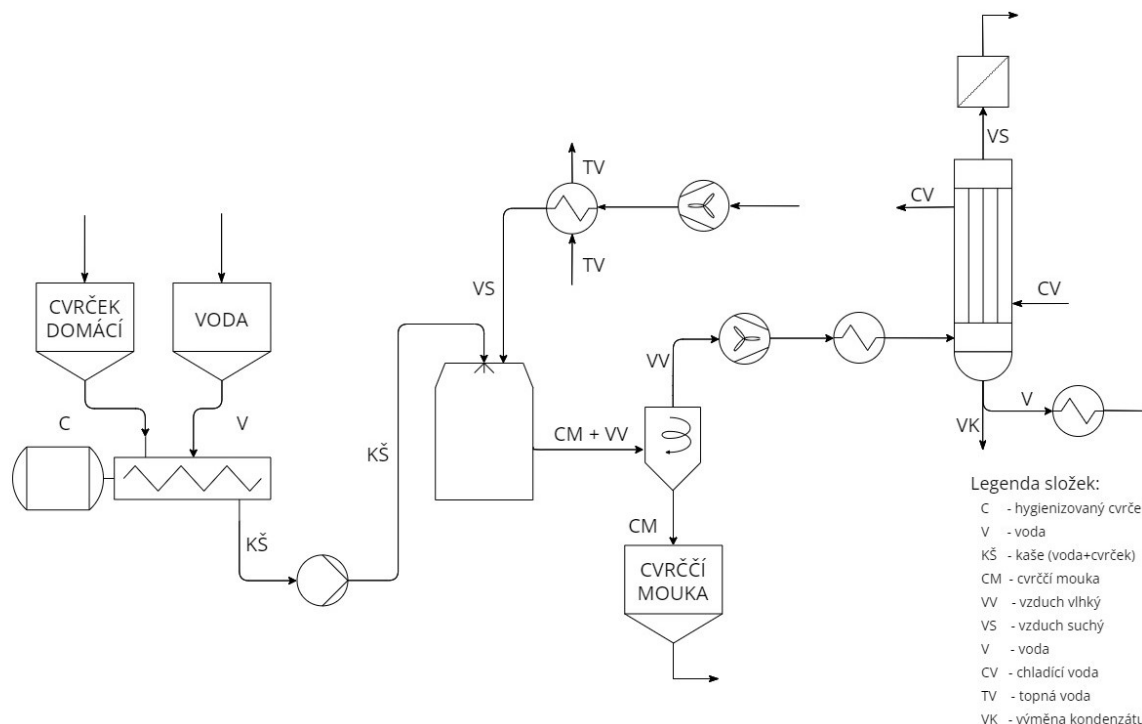
Po zpracování cvrčka v předešlých krocích (extruze a sušení) je v závěru procesu kontrolován požadovaný stupeň kvality mouky, a to 10 hm.% vlhkosti a 0,15 mm velikosti částic [19]. Celý proces končí balením a následnou distribucí.

Při volbě technologie je třeba zvážit energetickou náročnost, která se promítá do variabilních nákladů. Na následujícím obrázku je nastíněna zjednodušená energetická bilance, kde jsou patrné základní energetické vstupy. To je energie vynaložená na odpar vody a poté příkon elektromotoru. Je nesporné, že v mokré technologii je třeba odpařit větší množství vody. Energetická výhodnost záleží na poměru, ve kterém bude voda přiváděna (2/3, 4/3, atd.), k tomu je však nutné podrobnější posouzení, ale to není cílem této práce [20] [23].



*Obr. 12: Schéma energetické bilance mokré technologie*

Při počáteční rozvaze je třeba také posuzovat investiční nároky na mokrou technologii. Lze učinit jednoduchou úvahu na základě posouzení množství procesních zařízení, které se v technologii vyskytují. Na Obr. 13. je zobrazeno PFD schéma možného technologického řešení mokré linky. To obsahuje: 3x zásobník, 1x extrudér, 1x rozprašovací sušárna, 1x čerpadlo, 2x ventilátor, 1x cyklón, 3x výměník a 1x kondenzátor. Celkem 13 zařízení, které výrazně zvedají investiční náklady a snižují spolehlivost celé linky, která má exponenciální průběh. Zároveň vrůstající nároky na údržbu celé linky.



Obr. 13: PFD schéma „mokrý“ technologie

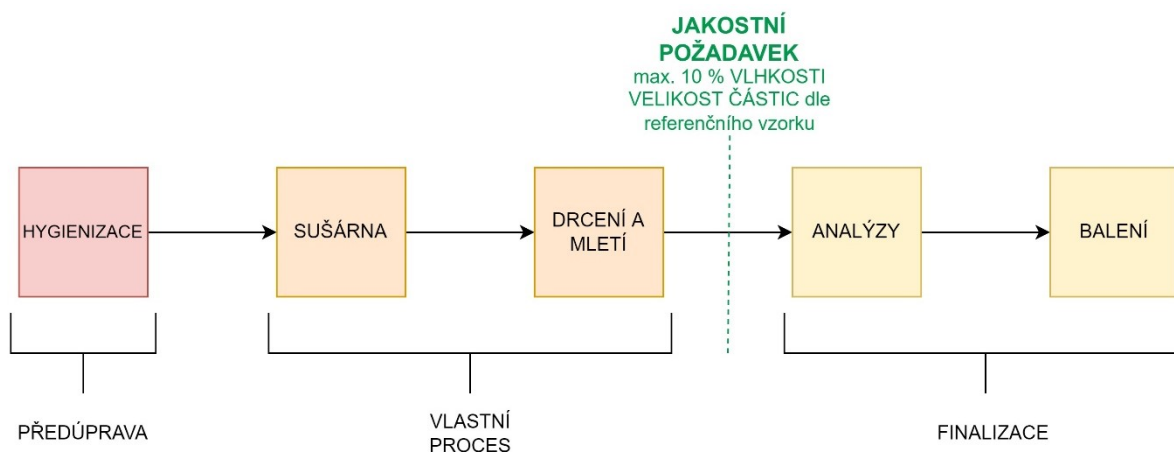
Mokrý metoda nachází uplatnění jen v obrovských průmyslových výrobcích, kde je možné zajišťovat stejnou kvalitu výsledného produktu pomocí přidávání dochucovadel a konzervačních látek společně s vodou nebo v průběhu homogenizace v extrudéru [24]. Tato metoda je tedy neefektivní a velmi nákladná z pohledu výzkumných účelů i z pohledu malé a střední výroby, která při tomto projektu bude uvažována.

### 2.2.2. Suchá metoda

Druhou metodou a zároveň nejběžnější, co se využití týká, je tzv. suchá metoda zpracování. Ta začíná technologií sušení obvykle realizovanou v troubách, které v porovnání s ostatními možnostmi vychází finančně šetrně. Velmi však záleží na velikosti výroby. Dalšími možnostmi může být např. mikrovlnné, vakuové sušení nebo sušení kapalným dusíkem, které se často využívá k předúpravě sušiny těsně před mletím, aby tělíčka cvrčků ztuhla a bylo snazší je rozmělnit na menší částičky. Menší částice pak není nutné opakovaně prohánět mletím, čímž se zvýší jeho efektivita. Horkovzdušné trouby mohou být plynové nebo elektrické. Elektrická varianta je úspornější, lépe se udržuje konstantní teplota a údržba je snazší [11].

Na Obr. 14 je znázorněno blokové schéma jednotlivých operací. Jsou seřazeny dle jednotlivých kroků, které po sobě v procesu následují.





Obr. 14: Blokové schéma suché variant výroby cvrččího prášku

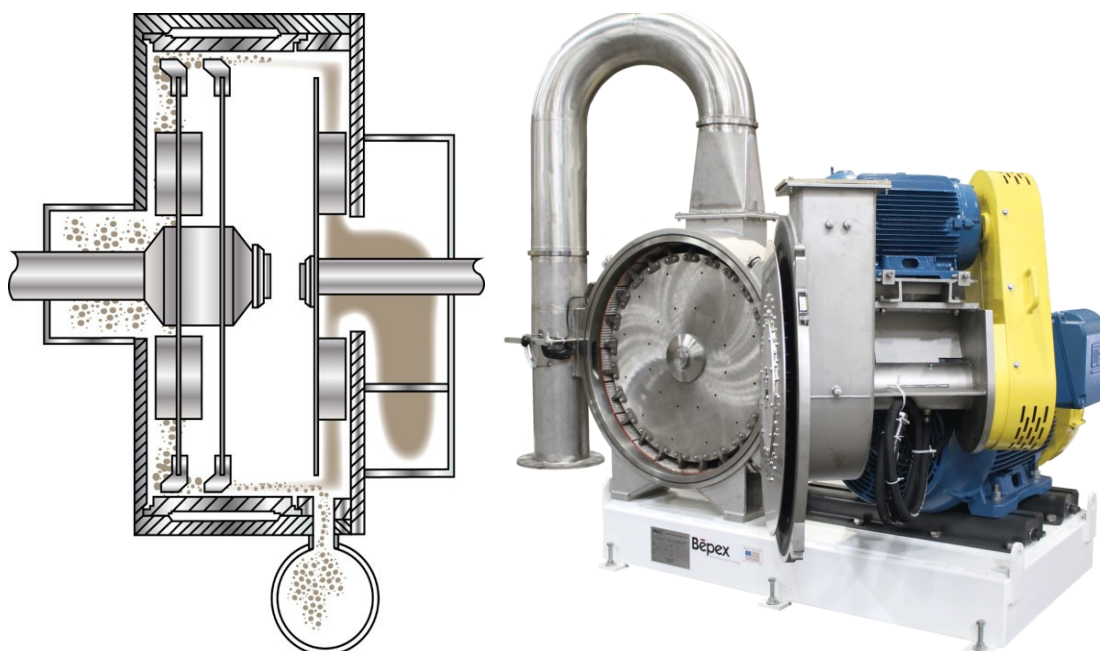
Celý proces suché metody začíná předúpravou, která už byla popsána u předchozí technologie. Následuje vlastní proces, kdy je na počátku materiál vysušen na konstantní hmotnosti a ihned semlet na mlýnu. Díky minimální prodlevě je cvrček dostatečně křehký a mletí je tak snazší a hladší. Na závěr opět proběhne analýza, balení a distribuce.



Obr. 15: Experimentální linka na mikrovlnné sušení Shandong Agricultural University [25]

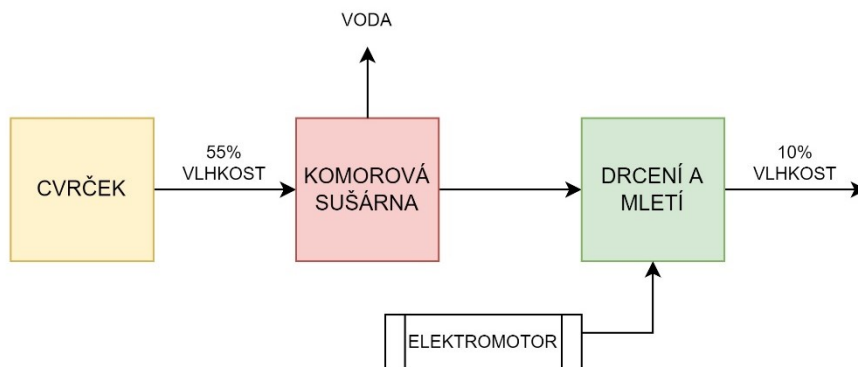
Tělo cvrčka podobně jako to lidské obsahuje ze 75 % tekutiny, znamená to tedy, že pro výrobu 1 kg sušiny je potřeba 4 kg živých cvrčků. Standardně sušení cvrčků v horkovzdušné troubě probíhá v rozmezí 4 až 5 hodin [11].

Následujícím krokem je mletí, které využívá k dezintegraci částic princip stříhu a provádí se ve vysokovýkonných kuchyňských mixérech, jako je např. Vorwerk Thermomix TM31 nebo OTTO BE-127 A [26] [20]. Výhodou je relativně nízká pořizovací cena a snazší dostupnost v porovnání s průmyslovými drtiči. Nevýhodou je však mnohonásobně nižší produkční výkonnost. Typy těchto strojů jsou proto výhodné k experimentálním účelům a pro domácí produkci. Příkladem pro průmyslové zpracování s velkým rozsahem produkce může být diskový mlýn Pulvocron PCS-20 od firmy Bepex International. Při experimentálním měření na Brigham Young University, kdy do stroje byly postupně umístěny dvě 12 kg vsádky vysušených cvrčků, bylo dosaženo následujících podmínek. Rychlost prvního rotoru mlýna  $10\,000\text{ min}^{-1}$ , rychlost druhého rotoru (třídíče)  $3000\text{ min}^{-1}$ , proud vzduchu  $476\text{ m}^3/\text{h}$ , teplota na vstupu se pohybovala mezi  $12,2 - 17,2\text{ }^\circ\text{C}$  a výsledný produkt vycházel hmotnostní rychlostí  $11,6\text{ kg/h}$  [23].



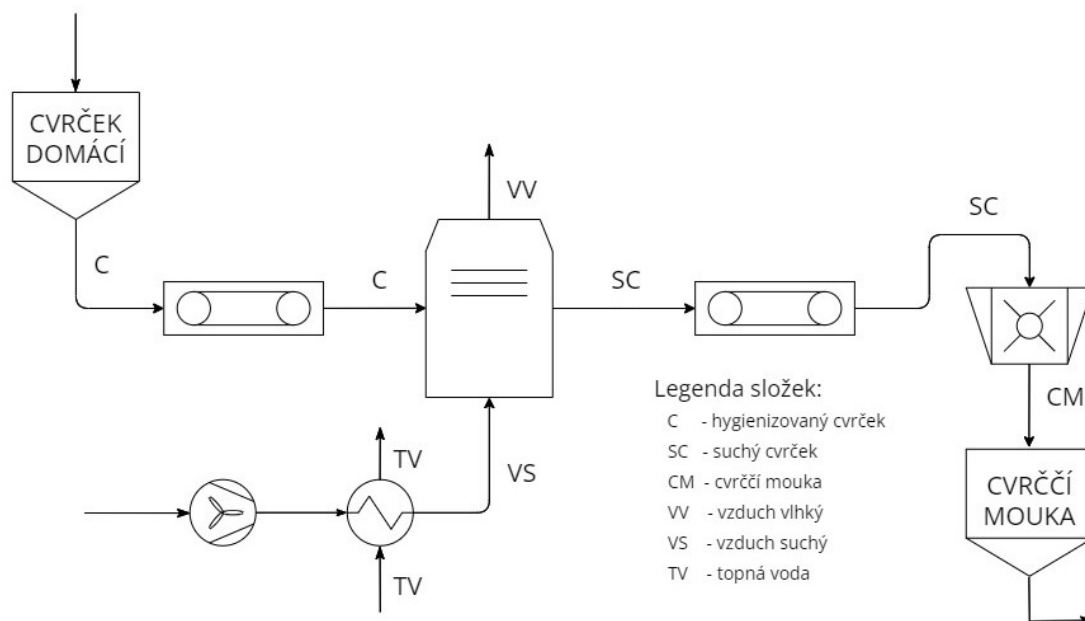
Obr. 16: Mlýn Pulvocron PCS 20 od společnosti Bepex [27]

Na následujícím obrázku je znázorněna energetická bilance, která je nezbytná při rozhodování o výběru technologie. Jsou zde vidět základní energetické vstupy jako je energie vynaložená na odpar vody a poté příkon elektromotoru. Ve srovnání s mokrou technologií jsou zřejmé menší nároky na množství vody, tedy nižší spotřeba energie pro výpar vody.



Obr. 17: Schéma energetické bilance suché technologie

Suchá technologie je složena z výrazně menšího množství procesních zařízení, jak je vidět na Obr. 18. Jsou to: 2x zásobník, 1x komorová sušárna, 1x mlýn (nožový/ultraodstředivý), 1x ventilátor, 1x výměník a 2x dopravník, v součtu 8 zařízení. Linka je tedy výrazně jednodušší, levnější na pořizovací i provozní náklady. Zároveň exponenciálně roste její spolehlivost a snižují se nároky na servis a obsluhu.



Obr. 18: PFD schéma „suché“ technologie

Jak již bylo uvedeno, tato varianta nachází široké uplatnění od domácích farem po středně velké podniky po celém světě. Existují i případy, kdy se při velkých objemech výroby vyplatí jen znásobit počet linek suché technologie zpracování než zavádět mokré provoz. To je na uvážení každého plánovače výroby, jaké má možnosti, a způsobu vyhodnocení situace. Díky širokému využití této technologie lze porovnat podmínky a stroje, kterých bylo využito pro jednotlivé účely zpracování hmyzu ve světovém měřítku.

### 2.3. Příklady využití hmyzu pro výrobu potravinářských produktů

V této kapitole jsou popsány projekty, které již byly realizovány ve světě a docházelo v nich k mletí nebo sušení cvrčků nebo jiného příbuzného hmyzu. Cílem je zjistit, v jakých podmínkách byl hmyz upravován, a získat díky tomu určitý přehled o postupech a způsobech zpracování, které bude využito v experimentální části práce.

Využití cvrččí mouky v chlebu – na Thajské univerzitě probíhal experiment sensorických vlastností chleba, kdy se cvrččí mouka využívala jako vysoko bílkovinové obohacovadlo. Podmínky předúpravy byly následující [28].

- Po oplachu byli cvrčci ochlazení tekutým dusíkem (1:1)
- Následovalo mikrovlnné sušení při výkonu 600 W – byla využita mikrovlnná trouba značky Sharp Model R-380I, 1200 W
- Mletí probíhalo na mlýnu Model D-42759 tak, aby bylo dosaženo hrubosti 0,149 mm
- Finální produkt byl uskladněn v polyethylenových sáčcích při teplotě -18 °C

Výroba cvrččí mouky v potravinářské kvalitě – na finské univerzitě probíhala výroba cvrččí mouky suchým způsobem. Projekt má podobné rysy jako ten náš. Podmínky při mletí a sušení byly následující [19].

- První vzorek byl sušen v komorové sušárně TERMAKS B8260 Incubator při 70 °C po dobu 5 h
- Druhý vzorek byl sušen mrazem v sušárně Dura Dry Freeze Dryer při stabilních podmínkách a teplotě - 87 °C a tlaku 1 mbar
- Mletí proběhlo v mlýnu Ultra Centrifugal Mill ZM 200 s dvěma velikostmi sít, a to 0,5 mm a 1 mm při 10 000 min<sup>-1</sup>

Vlastnosti adsorpce vlhkosti a odhad trvanlivosti prášku z cvrčka domácího – na univerzitě v Keni proběhl výzkum trvanlivosti prášku z cvrčka domácího. K předúpravě prášku bylo potřeba následujících podmínek [29].

- Vzorek byl sušen v univerzitním solárním stanu, kde byla teplota 50–60 °C a vlhkost 15–20 %
- Proces mletí proběhl v kuchyňském mlýnu Philips HR 2850, vzorek následně prošel sítem s velikostí ok 1 mm

Biochemické a sensorické charakteristiky frakcí cvrčků – ve finském Espu probíhal výzkum podmínek odtučnění cvrčků pomocí superkritické extrakce oxidu uhličitého. Cvrčci byli již zakoupeni usušení pomocí mrazu. Podmínky mletí pro předúpravu byly následující [30].

- Mletí probíhalo na víceúčelovém mlýnu typu Hosokawa Alpine multi-purpose mill UPZ-Ib s kolíkovým kotoučem – odtučněný hmyz byl mlet nadvkrát na  $17\,800\text{ min}^{-1}$

Zpracování jedlého hmyzu tradičními i inovačními způsoby – tato publikace porovnává jednotlivé druhy zpracování jedlého hmyzu ve světě. Zároveň zhodnocuje jejich účinnost a dopad na trh. Je zde popsáno sušení kobyly (Ruspolia nitidula), která je svou tělesnou strukturou velmi podobná cvrčkovi domácímu [31].

- Kobyly byly sušeny v konvenční komorové sušárně při teplotě  $80\text{ °C}$  po dobu 10 h – tím bylo dosaženo vlhkosti pod 5 %
- Druhý způsob bylo sušení mrazem, kdy při první fázi byly vystaveny teplotě  $-50\text{ °C}$  a tlaku 0,4 bar po dobu 48 h. Ve druhé fázi došlo ke snížení teploty na  $-55\text{ °C}$ , snížení tlaku na 0,021 bar při stejném čase
- Třetí způsob bylo sušení po dobu 24 h při teplotě  $60\text{ °C}$

Z těchto projektů je možné se poučit o vlhkosti zpracovávaného materiálu, použitých typech mlýnů, nastavení otáček a velikosti sít. Při experimentálním měření budou nápomocné k určování postupů a způsobů měření.

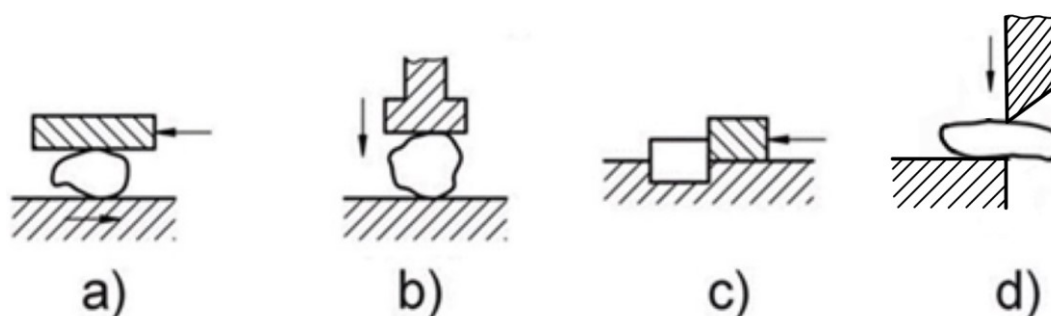
## 2.4. Mechanické rozpojování cvrčků

Pro vhodný výběr zařízení k procesu mletí je třeba stanovit smysluplný systematický postup. V případě této studie je třeba nejdříve provést rešerši na trhu dostupných zařízení. Ty poté blíže analyzovat, především pak způsob dezintegrace částic, který využívají, a následně velikost výstupního produktu. Na základě takto stanovených kroků lze relativně spolehlivě vybrat vhodný typ mlýnu pro požadované účely a zpracovávaný materiál.

### 2.4.1. Principy dezintegrace

Nejdříve je třeba nalézt základní obecné způsoby dezintegrace částic a mezi nimi dále vyhledat podobnost vůči rozpojování daného vzorku. To závisí na materiálových vlastnostech a uvažovaných možnostech, jak by se mohl vysušený cvrček chovat. Na tomto základě lze pak vybrat vhodné způsoby rozpojování a iterativně tak vybrat možné zařízení. V praxi lze rozdělit tyto silové účinky na osm základních principů, a to na drcení, trhání, smýkání, lámání, otěr, rozbíjení, rozlupování a stříh [32]. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tělo rovnokřídlého hmyzu je po vysušení velmi křehké. Proto se pro narušení jeho struktury hodí metody, které využívají nárazu, stříhu, otěru a smyku. Tyto způsoby jsou graficky zobrazeny na Obr. 19.





Obr. 19: Vhodné principy rozpojování částic a – otěr, b – rozbíjení, c – smyk, d – stříh [32]

Tyto principy silového působení z Obr. 19 se nejvíce využívají v následujících mlýnech:

- Mlýny s volně uloženými mlecími tělesy (kulové, vibrační, kuličkové)
- Mlýny kladkové
- Mlýny rotorové (ultraodstředivé, nožové, úderové, válcové)

Z těchto skupin zařízení je třeba vybrat ty, které svojí jemností mletí odpovídají požadovanému rozmezí velikosti zrn 0,04 – 0,15 mm [19].

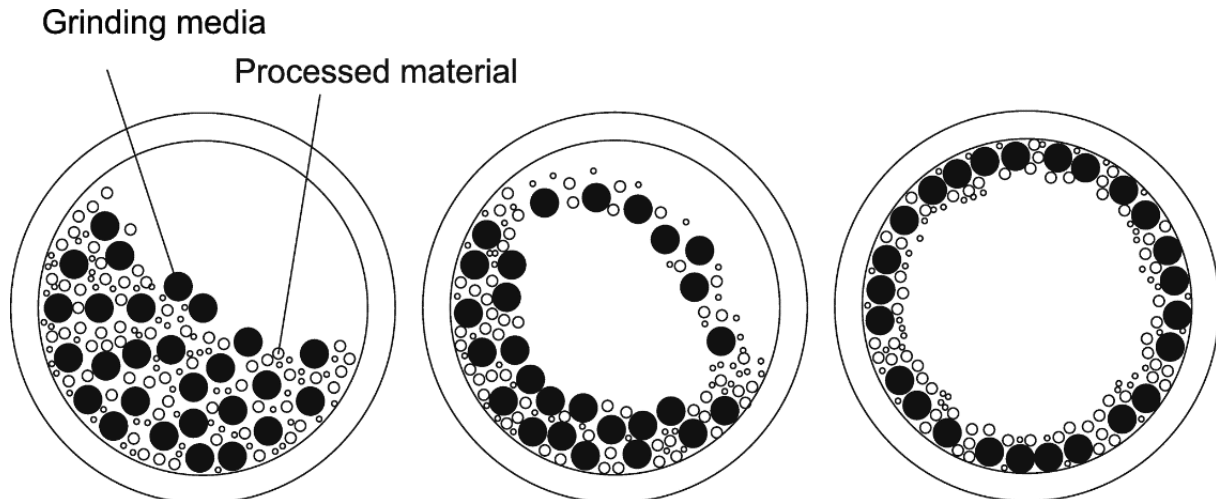
#### 2.4.2. Drtiče a mlýny

##### 2.4.2.1. Mlýny s volně uloženými mlecími tělesy

Do této skupiny náleží mlýny kulové, vibrační a kuličkové. Obecný princip mletí je založen na rotačním pohybu bubnu, ve kterém jsou mlecí tělíska uložena. Buben se otáčí vhodnými pracovními otáčkami a unáší s sebou mlecí tělíska, která při dosažení kritického bodu opouští rotační pohyb a dopadají na materiál. V této chvíli je mezi ně přiváděna buď voda nebo suchá směs, která je pomocí nárazů a třecích sil mezi tělísky tříštěna na menší kusy. Výsledná velikost částic produktu záleží na velikosti mlecích tělísek a čase stráveném v mlecí části zařízení. Výsledná jemnost jednotlivých typů je následující [32] [33]:

- Kulové – 0,08 – 20 $\mu$ m
- Vibrační – 20 – 100 $\mu$ m
- Kuličkové – 3 – 10 $\mu$ m

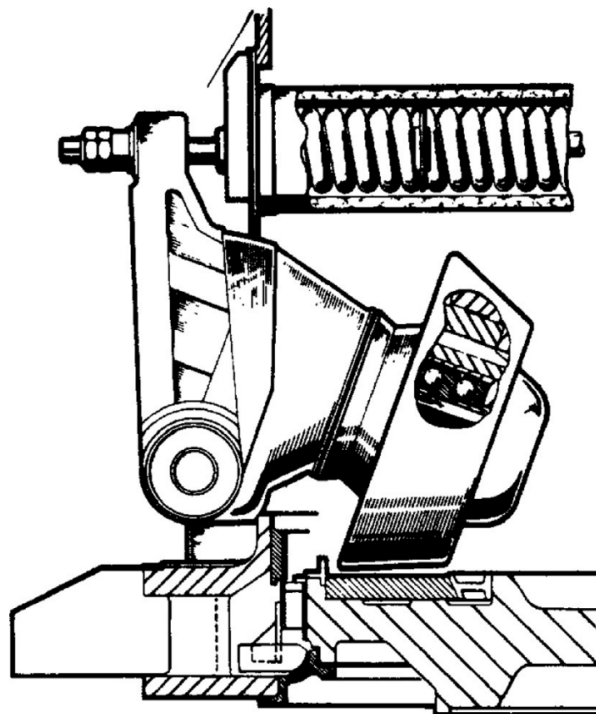
Uvedené typy mlýnů se ve většině případů vyskytují jako vsádkové. Existují ale i kontinuální mlýny, kde je buben rozdělen do několika sekcí s různou velikostí kuliček a vstupní produkt je tak rozpojován postupně na požadovanou jemnost. Tyto typy mlýnů mají široký rozsah použití od mletí rudy až po jemné materiály, např. barvy atd. Použitelnost je patrná i v možnosti mlít za sucha i za mokra. Všechny typy mlýnů splňují rozmezí požadované jemnosti výsledného produktu, a proto je třeba zkontrolovat cenovou hladinu daných typů [34].



Obr. 20: Pohyb mlecích tělísek se vzrůstající rychlostí (zleva doprava) v rotujícím rozpojovacím bubnu [35]

#### 2.4.2.2. Mlýny kladkové

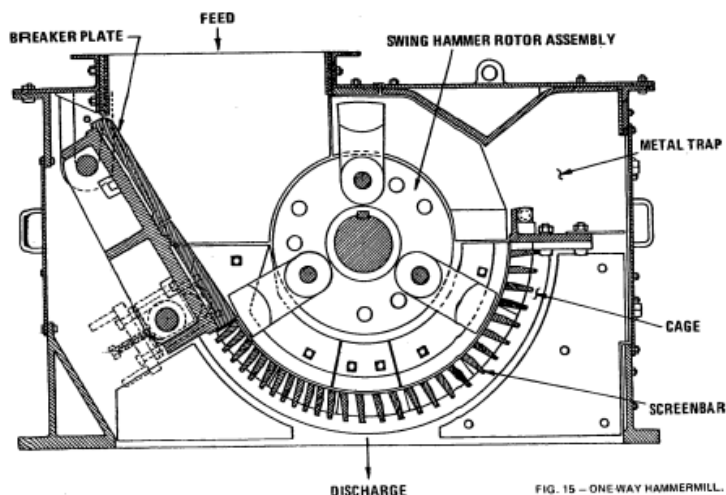
Princip mletí kladkového mlýnu je založen na rotaci talířové plochy, kam je přiváděn produkt. Ten je odstředivými silami unášen na obvod talíře, kde je mlet pomocí kladek. Částice jsou v oblasti pod hlavami kladek namáhány tlakem a smykem. Je možné s ním mlít i výbušné materiály. Jednou z hlavních surovin, které se na těchto mlýnech v potravinářství melou, je koření. To by se mohlo podobat cvrččím tělíčkům. Velkou nevýhodou je však velká zastavěná plocha, která roste s požadovanou jemností. To je způsobeno hmotností mlecích hlav a velkými přítlačnými silami. Proto tento zástupce není úplně vhodným kandidátem [32] [34].



Obr. 21: Princip fungování kladkového mlýnu [34]

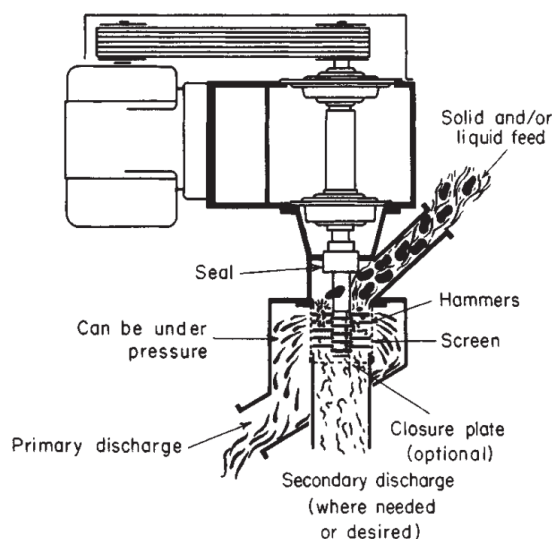
### 2.4.2.3. Úderové drtiče

Charakteristickým znakem těchto mlýnů je rotor, na kterém jsou otočně nebo pevně umístěny nárazové elementy. Ty svým pohybem naráží na protilehlou nárazovou desku statoru. Mezi tyto dva díly je přiváděna suspenze, která je rázově namáhána a rozpojována jak nárazem kladiv, tak třením částic navzájem mezi sebou [32].



Obr. 22: Schématické vyobrazení úderového mlýnu [36]

Speciálním zástupcem úderových mlýnů jsou mlýny ultraodstředivé, které se využívají k velmi jemnému mletí. Princip fungování je založen na přivádění před-produktu do středu mlecí komory, kde je za vysokých otáček odstředivými silami unášen na obvod mlecího disku. Tam se setkává s pevně uchycenými kladivky, které rázem rozbíjejí strukturu materiálu a napomáhají tak jeho rozpojování. Produkt nakonec prochází sítím, které obklopuje mlecí komoru, a je dále vyváděn ven z mlýnu.



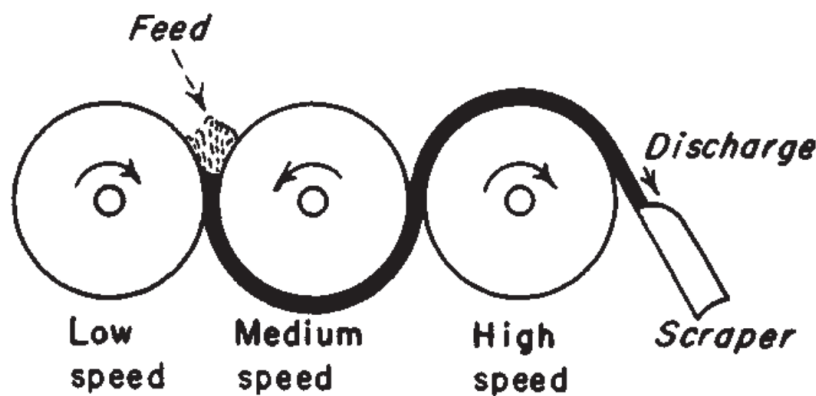
Obr. 23: Průřez kontinuálním ultraodstředivým mlýnem [37]



Tyto mlýny mohou pracovat ve vsádkovém i kontinuálním režimu. Při zapojení ventilátoru na výstup produktu lze zamezit poletování lehkých částic v komoře, tím usměrnit tok hmoty a zvýšit produkci. Tato zařízení jsou velmi drahá z důvodu požadavku na tuhost stroje, tím i neúměrně roste velikost zařízení vzhledem k velikosti rozpojovací komory. Při delším provozu na vysokých otáčkách je nutné stroj chladit [33] [37].

#### 2.4.2.4. Mlýny válcové

Existuje velké množství variací a zapojení válcových mlýnů od jednoválcové varianty, kdy válec svým tlakem a smykovým namáháním rozpojuje materiál o desku pod ním, přes dvouválcové varianty, kdy je vstupní produkt rozpojován mezi dvěma opačně rotujícími válci. Nejčastějším a energeticky výhodným je sériové zapojení jednotlivých válců, kterými prochází dané médium. Velikost mezer mezi válci se postupně zmenšuje a rychlost otáčení jednotlivých válců směrem ke konci procesu narůstá. Dvojice válců se pohybuje rozdílnou rychlostí, čímž dochází ke smykovému namáhání procházejícího materiálu. Tomu přispívá ještě rýhování válců. Tato koncepce se nejvíce využívá obecně pro mletí mouky, výrobu stělného prachu, nebo se takto dají např. upravovat i barvy. Největší výhodou tohoto konstrukčního provedení je stejnoměrné frakční složení, jednoduchost zařízení a krátká doba zdržení v mlecí komoře. Tímto způsobem lze mlet částice s velkou jemností, záleží jen na počtu válců. Zdá se proto být velmi vhodným typem vzhledem k produktu, který je vyžadován [32] [34] [37].



Obr. 24: Schématické vyobrazení válcového mlýnu [37]

### 3. Cíl práce

Základem celé této práce je předpoklad, že vysušený cvrček je suchý a křehký natolik, aby mohl být rozemlet na požadovanou jakost produktu, která je srovnatelná s mokrou metodou mletí. Z následujících experimentů dále vycházejí podmínky pro nastavení mlýnů. Dále jsou tedy stanoveny následující hypotézy, které se prolínají celou prací.

**Hypotéza:** Drcením a mletím suchého cvrčka ve vhodně provozně konfigurovaném mlýnu lze docílit stejné nebo lepší jakosti cvrččí mouky jako v případě tradiční mokré metody.

Cílem této práce je ověření předpokladu, že pomocí suché metody lze zpracovávat cvrčka domácího na jemnou mouku, která svou kvalitou bude srovnatelná se svými konkurenty na domácím trhu (zpracovanými mokrou technologií). Toho bude docíleno pomocí experimentálních metod měření na bubnovém, nožovém a ultraodstředivém mlýnu, případně jejich kombinací. Sledované parametry pak budou otáčky a vhodná velikost sít mlýnů. Pokud bude potvrzena hypotéza, že lze dosahovat suchou metodou podobné kvality dle zjištěných parametrů, bude možné výrazně lépe vybrat komerčně dostupný stroj pro menší decentralizované výroby.

Přidruženým cílem je posoudit energetickou náročnost mletí suchou metodou. Předpokládá se, že suchá technologie je energeticky šetrnější především díky menšímu počtu zařízení a nižšímu výparnému množství vody v procesu. Za tímto účelem bude provedeno měření energetické náročnosti rozpojení tělíček cvrčka domácího pro dané způsoby mletí a drcení.

Jak bylo zmíněno v rešerši, dnes se hledá úspora pouze ve velikosti zpracování. Tato práce má však ambici ukázat, že je možné cvrčky zpracovávat i v menších decentralizovaných výrobních se stejnou kvalitou výsledného produktu a nižší pořizovací cenou zařízení. Hledá tedy zařízení či kombinaci zařízení, které umožní splnit daný cíl. Tato technologie by měla být prostorově nenáročná, jednoduchá, snadno obsluhovatelná, s jednoduchým servisem a dlouhou životností.

Práce cílí na změnu vnímání cvrčka domácího jako běžného hmyzu a zároveň poukazuje na jeho potenciál jako potravinářského produktu. Zaměřuje se především na fyzikální vlastnosti suroviny, které se projevují při mletí a analýze velikosti částic.

## 4. Experimentální měření procesních podmínek dezintegrace

### 4.1. Charakteristika suroviny – sušina, velikost

#### 4.1.1. Stanovení velikosti vstupující částice

Jednou z hlavních analýz, kterou je třeba nejen při mletí provádět, je stanovení hlavních rozměrů vstupujícího materiálu. Na základě toho lze částice zjednodušit do průměrného stavu a s tím následně během procesu počítat. V tomto případě je velmi složitý tvar cvrččího těla zjednodušen do podoby podlouhlého hranolu. V rámci analýzy byla provedena série měření tělíček cvrčků, kdy byla měřena jejich šířka, délka a výška. Vzorkem bylo 10 kusů hmyzu, jak lze vidět na Obr. 25.

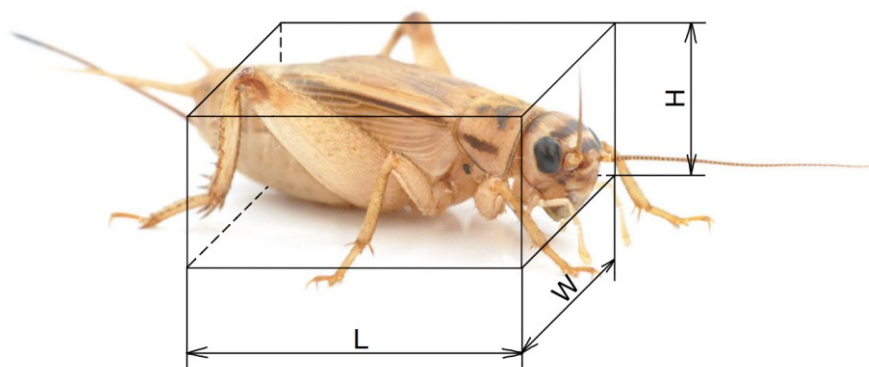


Obr. 25: Vzorky měřených cvrčků

Průměrné hodnoty délky ( $l$ ), šířky ( $w$ ) a výšky ( $h$ ) jsou uvedeny v následující tabulce společně se směrodatnou odchylkou.

Tab. 3: Tabulka průměrných hodnot velikosti zpracovávaných cvrčků domácích

	$l$ [mm]	$w$ [mm]	$h$ [mm]
$\bar{\phantom{x}} \pm \sigma$	$1,868 \pm 0,148$	$0,548 \pm 0,035$	$0,514 \pm 0,031$



Obr. 26: Model cvrčka nahrazený hranolem [38]

#### 4.1.2. Stanovení celkové sušiny

Vzorek byl charakterizován velikostí celkové a organické sušiny. Celková sušina má výrazný vliv na způsob zpracování daného materiálu, protože s klesající vlhkostí roste křehkost materiálu a tím i snadnost zpracování pomocí předem vybraných způsobů dezintegrace. Té bylo dosaženo v komorové sušárně s nucenou cirkulací od společnosti BINDER model Classic Line při 105 °C, kdy byl vzorek sušen do konstantní hmotnosti.



*Obr. 27: Sušení první várky cvrčků v komorové sušárně*

Výpočet celkové sušiny proběhl prostým poměrem mezi hmotnostmi živého cvrčka a hmotností usušeného, jak tomu ukazuje následující vzorec:

$$TS = \frac{m_{\text{usušených cvr.}}}{m_{\text{čerstvých cvr.}}} \cdot 100 \quad (1)$$

Prostým dopočtem do sta procent byla získána procentuální vlhkost daného vzorku. Výpočet je uveden níže:

$$TH = 100 - TS \quad (2)$$

V Tab. 4 jsou prezentovány zjištěné hodnoty jednotlivých měření. Je možné si všimnout relativně velkého rozdílu naměřených vlhkostí mezi jednotlivými várkami cvrčků. Důvodem může být nedostatečné vysušení v předúpravě živých cvrčků, kdy jsou z hygienických důvodů vařeni ve vodě po dobu 10–15 minut a následně sušeny přirozenou konvekcí na otevřeném vzduchu. Také toto může být způsobeno jak mírnou nepřesností při manipulaci se vzorkem, tak především rozdílnou stravou daných várek.

Další chybou, která má vliv na přesnost měření, je zaokrouhlování měřené hmotnosti. Všechny vzorky byly měřeny na váze s přesností na desetitisíciny, kdy bylo možné s rostoucím časem pozorovat, jak vzorek těžkne díky adsorpci vzdušné vlhkosti. Bylo proto počítáno jen s přesností na tisíciny.

Tab. 4: Tabulka naměřených dat celkové sušiny

Datum měření	TS [hm.%]	TH [hm. %]
14.10.2021	44,6 %	55,4 %
16.2.2022	54,6 %	45,4 %

#### 4.1.3. Stanovení organické sušiny

Dalším provedeným rozbohem je stanovení organické sušiny, která vypovídá o poměru živé tkáně a popeloviny v sušině, což je hmotnostní zastoupení všech minerálních látek obsažených v těle cvrčka.

Analýza byla provedena v laboratorní horizontální komorové peci LAC LE, kdy byl vzorek předsušený při 105 °C, následně žihán při 550 °C až do konstantní hmotnosti. Po konci procesu zbyla v otevřené keramické misce jen popelovina. Opět byla provedena dvě měření.



Obr. 28: Popelovina cvrčka domácího po žihání



Výpočet organické sušiny proběhl prostým poměrem hmotností mezi hmotností sušiny a popeloviny, jak ukazuje následující vzorec:

$$VS = \frac{m_{\text{žlhaných cvr.}}}{m_{\text{předsušených cvr.}}} \cdot 100 \quad (3)$$

Prostým dopočtem do sta procent byla získána procentuální organická sušina daného vzorku. Výpočet je uveden níže:

$$TS = 100 - VS \quad (4)$$

V tabulce níže je vyjádřen rozdílný hmotnostní podíl minerální složky v těle cvrčka domácího. Ten má výrazný vliv na mechanické vlastnosti materiálu a opotřebení nástrojů. Vhodným vysvětlením k takto rozdílným hodnotám je právě strava, kterou byl cvrček krmen. Ta má vzhledem k jeho extrémně rychlému metabolismu klíčový vliv na kvalitu výsledného produktu a je nutné ji zohlednit. Zároveň záleží, jak dlouho a za jakých teplot byla skupina chována. Je známo, že při teplotách okolo 28 °C má cvrček domácí celkově dvakrát nižší kalorický příjem do stádia dospělce než při teplotách okolo 25 °C. S tím je spojen i dvakrát menší příjem potravy, a tedy i nahromaděných látek, jako jsou makro a mikro biogenní prvky a stopové prvky [39]. Klíčovou roli u kvality výsledné potraviny tedy hraje způsob chovu, při kterém je nutné sledovat teplotu i stravu zkrmovaného hmyzu.

Tab. 5: Tabulka naměřených dat organické sušiny

Datum měření	VS [hm.%]	TS [hm.%]
22.11.2021	3,2 %	96,8 %
16.2.2022	1,1 %	98,9 %

Z extrémní hodnoty měření vyplývá, že procentuální obsah minerální složky v těle cvrčka je 3,23 %. Ta v porovnání s průměrnou hodnotou z literatury je překročena téměř o dvojnásobek. Z Tab. 1 obsahu minerálů v úvodní kapitole vychází poměr minerálních složek 1,69 % [3]. Naproti tomu druhá naměřená hodnota se již relativně blíží uváděné průměrné hodnotě z první kapitoly.

#### 4.2. Testování hypotézy o postupu mletí – prvotní experiment

Než dojde k určení hypotézy, je nutné definovat přesnou hodnotu jemnosti produktu, které je potřeba dosáhnout. To znamená najít referenci ve formě komerčního produktu, ke kterému se bude vše stahovat.

#### 4.2.1. Referenční vzorek

K reprezentaci odpovídající kvality vzorku byl vybrán komerčně prodávaný produkt české značky SENS na Obr. 29. Důvodem výběru je etablovanost na českém trhu a vhodnost použití společně s moukou na obohacení pokrmů, kdy je prášek přidáván v rozmezí 10 – 20 hm. % do dané směsi [40].



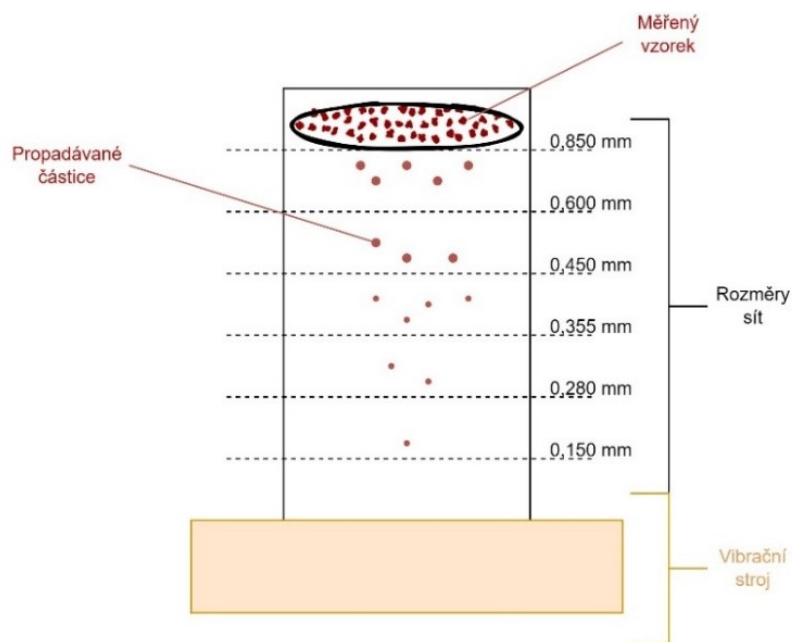
*Obr. 29: Proteinový prášek na vaření a pečení [40]*

Na počátku jsou definovány vhodné parametry, které budou u produktu sledovány a vůči kterým jsou vztažena další experimentální měření. Těmi bude velikost nejmenější frakce ve vzorku a dále pak střední objemový rozměr dle hmotnosti  $D_{50}$ . Je to hodnota velikosti částic, pod kterou se vejde přesně polovina obsažených částí ve vzorku. Oba tyto ukazatele byly určeny pomocí síťové analýzy na vibračním stroji JBS IVEX, VP 200, zobrazeném na Obr. 30.



*Obr. 30: Vibrační stroj JBS IVEX, VP 200*

Princip sítové analýzy spočívá v rozdělení vzorku na jednotlivé frakce pomocí vibračního pohybu stroje. Síta jsou řazena vzestupně dle velikosti od spodní misky, kdy síto s největšími oky je umístěno úplně nahoře. Na toto síto je položen měřený vzorek, který je po spuštění procesu postupně sklepáván do spodních pater. Na těchto patrech se kontinuálně třídí jednotlivé částice dle velikosti od největších v horní části až po ty nejjemnější ve spodních patrech. Vzorek byl vždy setřásán po dobu 90 s, kdy se hmotnost vzorku pohybovala pro všechna měření v rozmezí 10–30 g. Přehledný princip fungování a konfigurace sít je znázorněn na Obr. 31.



Obr. 31: Schématické zobrazení principu sítové analýzy

Po sklepaní vzorku je třeba rozebrat jednotlivá patra a zvážit síta společně se vzorkem. Následně vyhodnotit rozdíl hmotnosti samotného síta a síta se vzorkem, čímž lze zjistit hmotnost zachycených frakcí na jednotlivých patrech. Tyto hodnoty jsou zaneseny do dvourozměrného souřadného systému  $xy$ . Z měření je zřejmé, že jednotlivé body sledují určitý trend. Ten ale nelze jen aproximovat jednoduchou regresní křivkou, kterých využívá MS Excel. Je proto třeba si zvolit vhodný matematický model, který s určitou přesností aproximuje všechny body a vytvoří tak charakteristickou distribuční křivku. K tomu lze využít tříparametrický nebo dvouparametrický matematický model. Dvouparametrické modely svou přesností dostačují pro většinu případů zrnitosti částic. Mezi ty nejběžněji užívané modely patří: normální rozdělení velikosti částic, logaritmicke-normální rozdělení velikosti částic a rozdělení velikosti částic dle Rosina, Rammlera, Sperlinga a Benneta (RRSB) [41].

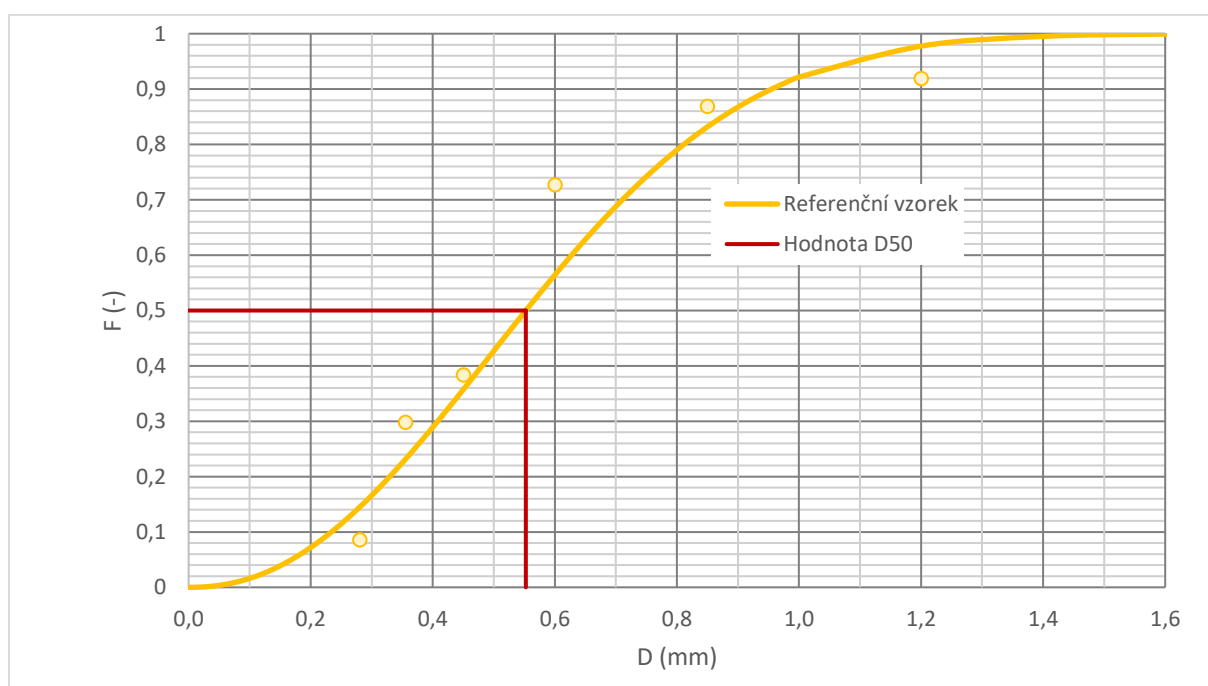


Při použití modelu RRSB pro rozložení velikosti částic dle hmotnosti platí následující vztah.

$$1 - F = \exp \left[ - \left( \frac{D}{\bar{D}} \right)^n \right] \quad (5)$$

Kde  $\bar{D}$  vyjadřuje střední rozměr a  $n$  index polydisperzity.

Po zanesení všech naměřených hodnot a proložení matematického modelu RRSB vznikne kumulativní křivka rozložení velikosti částic dle hmotnosti pro referenční vzorek, která je zobrazena níže. S tímto modelem budou srovnávány všechny následující pokusy.



Obr. 32: Křivka kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti referenčního vzorku se zobrazenou hodnotou  $D_{50}$

Při tomto měření byla stanovena hodnota  $D_{50}$  z rovnice (5), kdy je za hodnotu  $F$  dosaženo 0,5 a vzorec je upraven do následujícího tvaru.

$$D_{50} = D_p \cdot e^{-\frac{0,368}{e}} \quad (6)$$

Tato hodnota dává představu o tom, jakou maximální velikost částic má 50 hm. % vzorku. Dalšími pomocnými parametry jsou pak  $D_{10}$  a  $D_{90}$ , které se počítají obdobně. Všechna tato kritéria jsou uvedena v následující tabulce.

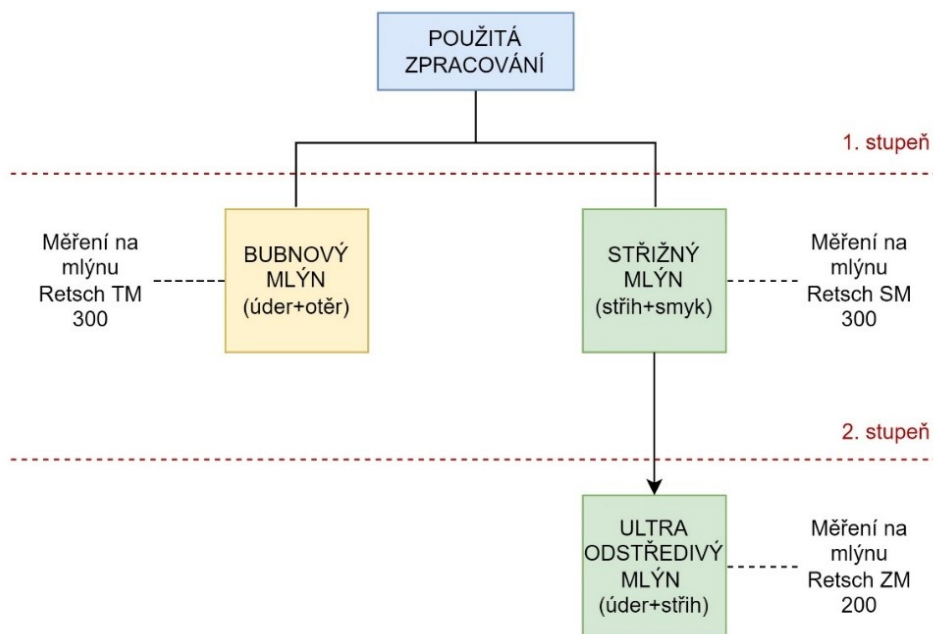
Tab. 6: Základní hodnoty referenčního vzorku

D <sub>10</sub> (mm)	0,234
D <sub>50</sub> (mm)	0,552
D <sub>90</sub> (mm)	0,955

Díky těmto třem pomocným bodům je možné určovat podobnost kumulativních křivek rozložení velikosti částic dle hmotnosti a posuzovat tak jejich vhodnost.

#### 4.2.2. Stanovení hypotézy

Hypotéza byla stanovena na předpokladu, že suché křehké cvrčky lze rozpojit na jakost komerčního produktu pomocí bubnového, nožového nebo ultraodstředivého mlýnu, případně pomocí jejich vzájemné kombinace. Na základě provedené rešerše vhodných mlýnů v předchozích kapitolách bylo přihlédnuto k výstupním velikostem částic daných mlýnů a možnostem laboratoře. Na základě těchto skutečností byla stanovena kombinace dezintegračních metod, která je schematicky vyjádřena na Obr. 33.



Obr. 33: Vize hledání správné konfigurace laboratorních zařízení

Samotné testování a proces optimalizace probíhá na dostupných zařízeních z laboratoře Ústavu procesní a zpracovatelské techniky ČVUT. K dispozici jsou následující zařízení: ultraodstředivý mlýn ZM200, střížný mlýn SM300 a kulový mlýn TM300. Všechna tato zařízení jsou od firmy Retsch.

K potvrzení uvedené hypotézy z úvodu bylo provedeno základní měření na každém stroji tak, aby bylo možné určit, jestli je uvedená metoda vhodná pro tento typ produktu a má

smysl ji rozvíjet a hledat nastavení a parametry zařízení. Na základě procesních parametrů jednotlivých zařízení byly navrženy dva postupy.

- První, vícestupňové mletí, nejdříve předúprava na střížném mlýně a následně domletí meziprojektu na výslednou jemnost v ultraodstředivém mlýně.
- Druhý, jednostupňový proces, mletí v kulovém mlýně na požadovanou jemnost. Jednotlivé postupy budou blíže popsány v následujících odstavcích. K experimentům pro ověření hypotézy je užíváno vzorku o vlhkosti 4,91 hm. %.

#### 4.2.3. Kulový mlýn

Tento proces je jednostupňový a principiálně velmi jednoduchý. Požadovaný materiál se umístí do bubnu společně s mlecími tělísky a nechá se v uzavřeném bubnu rotovat po určitý časový úsek tak, aby bylo dosaženo požadované jemnosti produktu. Nastavily se vhodné pracovní otáčky tak, aby v kritickém bodě došlo k převládnutí gravitačního zrychlení nad odstředivým. Tím došlo k nerovnováze a kuličky začaly padat v horní úvrati bubnu. Díky tomu dojde k maximálnímu využití rozpojovací energie, jak je popsáno na Obr. 20. Výpočet provozních otáček je následující.

$$n_p = \frac{(0,5 \div 0,64)}{\sqrt{D_B}} \quad (7)$$

$$n_p = \frac{0,64}{\sqrt{0,304}} = 1,16 \text{ ot./s} = 69,7 \text{ ot./min.}$$

Otáčky pro kulový mlýn byly nastaveny na vypočtenou hodnotu a při mletí naprázdno byly měněny otáčky okolo získané hodnoty tak, aby koule vhodně narážely na buben. Nakonec bylo vyhodnoceno  $80 \text{ min}^{-1}$  jako optimální hodnota. Pokusy probíhaly na kulovém mlýnu typu TM300 a na keramickém kulovém mlýnu při vhodných pracovních otáčkách a různém počtu mlecích tělísek. Velikost vzorku při všech měřeních byla o velikosti 10 g. Následují podmínky jednotlivých zkoušek:

TM300:

- 1. pokus –  $80 \text{ min}^{-1}$ ; 4 x velké ocelové koule + 55 x malé ocelové koule; 59 min.
- 2. pokus –  $80 \text{ min}^{-1}$ ; 40 x velké ocelové koule; 59 min.
- 3. pokus –  $80 \text{ min}^{-1}$ ; 40 x velké ocelové koule; 5 min.

Keramický mlýn:

- 4. pokus –  $150 \text{ min}^{-1}$ ; 60 x keramické koule; 3 min.

U prvního měření nedošlo k dosažení požadované jemnosti (0,280 mm) ani při maximálních otáčkách ani maximálním čase operace, kterého je stroj schopen. Výsledný produkt skončil nalepený na stěně bubnu a měl hmatatelně větší vlhkost. To mohlo být způsobeno jak zvýšenou vlhkostí zpracovávaného vzorku, tak větším obsahem tukových zásob v těle cvrčka domácího. Při dalších pokusech byly užity větší koule z důvodu, že bude docházet k větším rázům a materiál nebude rozmazáván o stěnu tak velkým povrchem, jako je tomu u menších tělísek. Bohužel ani jeden z pokusů nevykazoval změnu kvality výsledného produktu lišící se od výstupu z prvního pokusu.



*Obr. 34: Vzorek číslo 1,2,3 po konci mletí*

Z toho důvodu byl ve čtvrtém pokusu použit keramický kulový mlýn, ani ten však nedokázal splnit požadované parametry.



*Obr. 35: Mletí v keramickém mlýnu*

Kulové mletí při počátečním testování neprokázalo své kvality, a to jak z pohledu kvality výsledného produktu, tak ani z časových a energetických hledisek. Tento způsob je velmi nevhodný s nejistým výsledkem požadované jemnosti. Jedním z hlavních důvodů je vlhkost vzorku, který do procesu vstupuje. Je to dáno strukturou cvrčka, kdy vnitřní obsah jeho těla je velmi jemný a při dlouhodobém smykovém namáhání se z něho stává kaše. Je pravděpodobné, že by výsledky mletí v kulovém mlýně byly mnohem úspěšnější, pokud by celý proces probíhal za mokra. To je však způsob, kterému se chceme od začátku vyvarovat. Nejen z důvodu jeho vyšší náročnosti, ale i ekonomiky celého procesu.



*Obr. 36: Přehled mlecích tělísek*

#### 4.2.4. Nožový + ultraodstředivý mlýn

Jak již bylo zmíněno, tento proces je vícestupňový. V prvním kroku, na střižném mlýně SM300, je cílem na jeden průchod namlít produkt co nejvyššího stupně jemnosti. Na tomto zařízení proběhly 2 pokusy, kdy byla posuzována výkonnost zařízení. Jednotlivé pokusy byly prováděny s dávkou o hmotnosti 12,5 g a hlavním kritériem byla „prázdná komora“, tedy stav, kdy už v mlecí části nezbude žádný vzorek. To bylo zajištěno zapojením podtlaku za komorou. Následují podmínky jednotlivých zkoušek.

- 1. pokus – 3 000 min<sup>-1</sup>; velikost ok 1,5 mm; zapnut podtlak
- 2. pokus – 3 000 min<sup>-1</sup>; velikost ok 0,5 mm; zapnut podtlak

V prvním pokuse bylo nastaveno 3000 min<sup>-1</sup>, což je nejvyšší možná hodnota stroje. Zároveň do něho bylo umístěno síto s velkými oky, aby se mlecí komora nezahtíla. Během pokusu částice plynule odcházely a mlýn zvládl celou dávku bez problémů. Jediným možným parametrem, který jde ještě v procesu změnit, je právě velikost síta.



Proto bylo při druhém pokusu zmenšeno síto na výstupu a opět byla sledována stejná logika. I druhý pokus zařízení zvládlo bez problémů. Je tedy možné využít maximálního výkonu mlýnu k předmetí sušených cvrčků. Během obou pokusů bylo využito podtlaku za mlecí komorou, aby produkt lépe odcházel. Toho se docílilo pomocí vysokovýkonného vysavače připojeného na cyklón umístěný na výstupu.



*Obr. 37: Zapojení sestavy nožového mlýnu*

Při druhém stupni mletí na ultraodstředivém mlýnu ZM200 je záměr obdobný, dosáhnout co nejefektivnějšího mletí, tedy ideálně najít takové podmínky, kdy vzorek absolvuje jen jeden průchod mlýnem a při výstupu splní požadované podmínky. Tedy velikost částic se bude pohybovat v rozmezí 0,04 - 0,15 mm [19]. Opět byly provedeny 2 pokusy. Byla k tomu využita předemletá mouka z druhého pokusu ve střížném mlýně z důvodu vyšší jemnosti částic. Velikost vzorku se pohybovala okolo 6 g. Následují podmínky jednotlivých zkoušek:

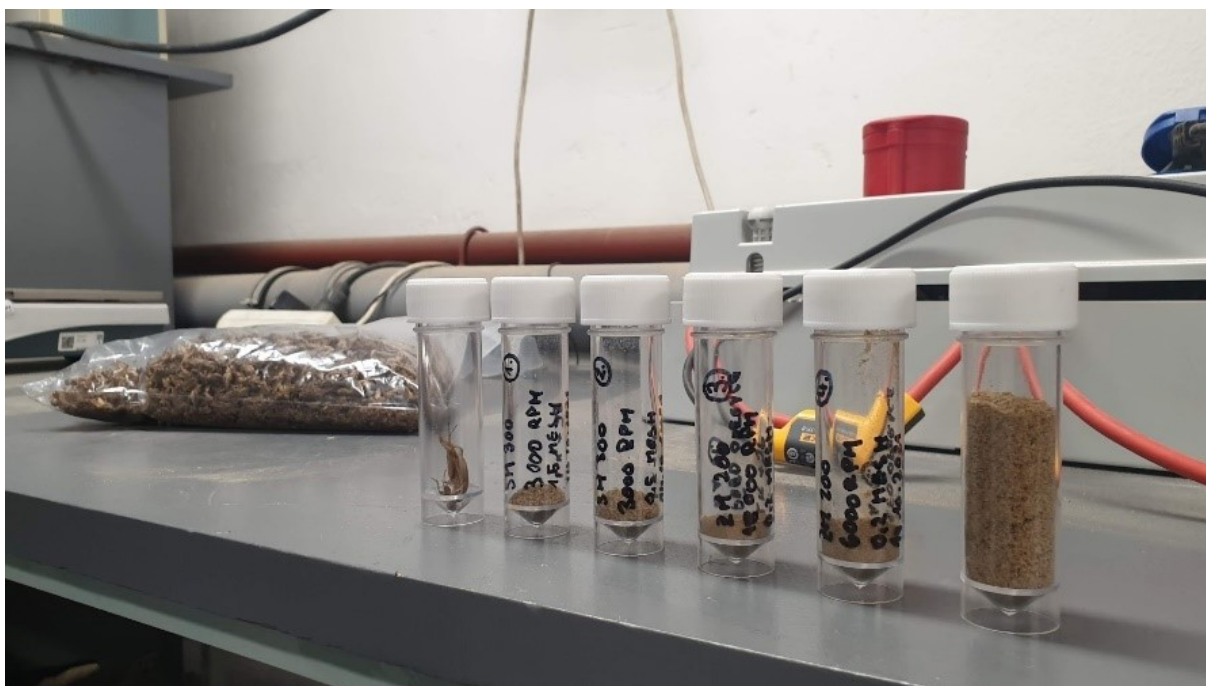
- 1. pokus – 18 000 min<sup>-1</sup>; velikost ok 0,2 mm
- 2. pokus – 6 000 min<sup>-1</sup>; velikost ok 0,2 mm

Prvotní myšlenka, jak postupovat, byla úplně stejná. Zvolí se největší otáčky a pokud stroj nebude schopen vzorek správně mlít, bude se postupovat sestupně. První pokus se zpočátku vyvíjel nadějně, ale v průběhu dávkování došlo k zahoření a spálení vzorku. To mohlo být způsobeno nekonzistentním dávkováním vzhledem k velkým disipovaným energiím. Došlo nárazově k větší dávce, zahltla se mlecí komora a mouka byla připečena na síto



na vnějším obvodu komory. Tato sestupná metoda měření byla přehodnocena, především proto, že čištění síta je časově náročné a klesá tak efektivita měření. Proto při druhém pokusu byly nastaveny výrazně nižší otáčky, a to třetinové. Během tohoto pokusu nebyly sledovány žádné negativní vlivy a průběh byl čistý. Při obou pokusech bylo využito nejmenší dostupné síto, a to s velikostí ok 0,2 mm.

Při tomto základním ověření prvotních podmínek mletí na nožovém a ultraodstředivém mlýně bylo ověřeno, že je možné je využít k dosažení požadovaných finálních rozměrů. Je nezbytné najít vhodnou konfiguraci.

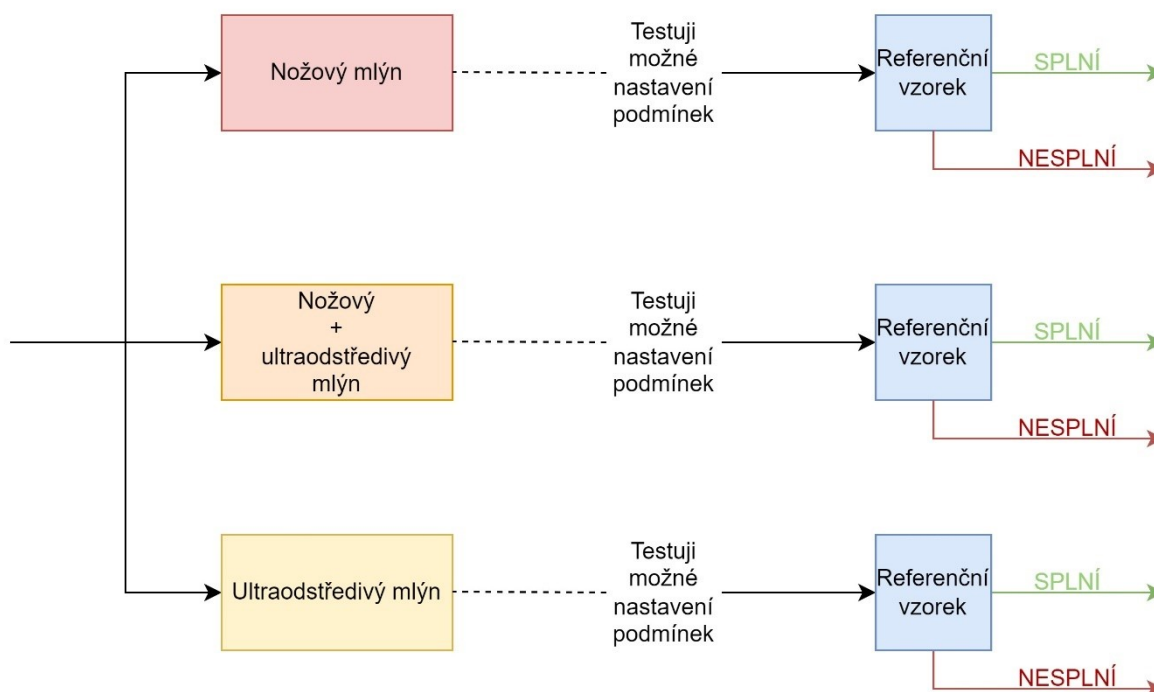


*Obr. 38: První vzorky cvrččí mouky při různých podmínkách mletí*

#### 4.3. Plán experimentů – popis obecného postupu, použitá zařízení

V předchozí kapitole byla ověřena prvotní hypotéza, která vyvrátila zpracování cvrčků na kulovém (bubnovém) mlýnu jako neefektivní a s nejistou kvalitou výsledného produktu. Přistoupilo se tedy blíže ke kombinaci střížného a ultraodstředivého mlýnu, která vycházela jako vyhovující. K posouzení jemnosti částic, kvality výsledného produktu a možnosti srovnání jednotlivých technologií je třeba určit referenční hodnotu, vůči které budou následující výsledky posuzovány.

Následně se systematicky rozdělily probíhající pokusy tak, aby byly dostatečně otestovány samotné mlýny, a i jejich kombinace. Za tímto účelem bylo vytvořeno následující schéma na Obr. 39, které dostatečně přehledně zobrazuje princip testování.

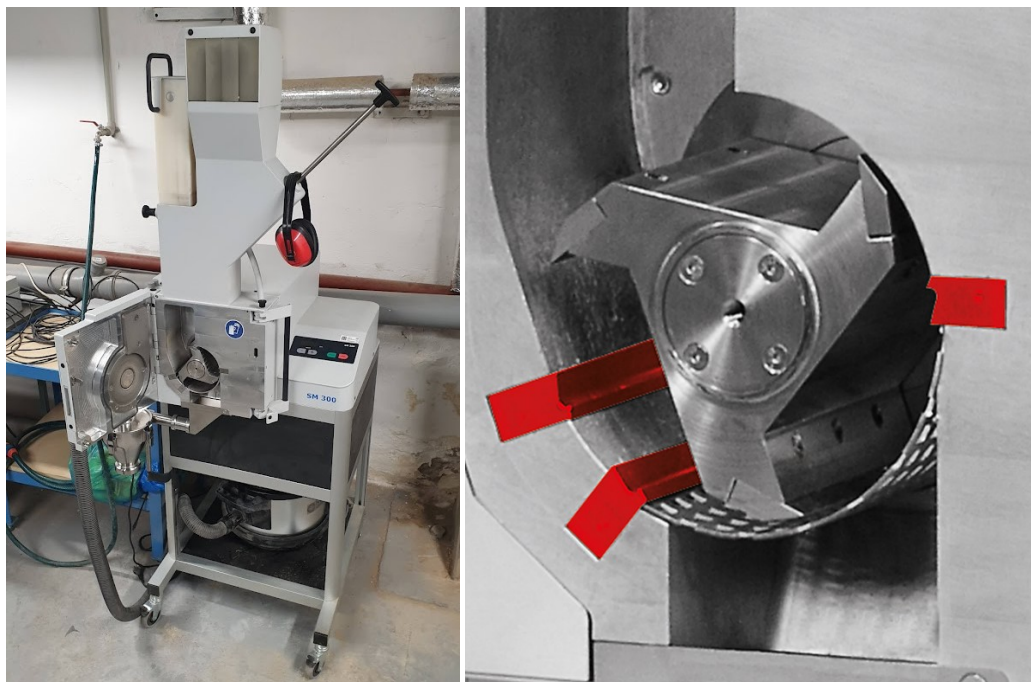


Obr. 39: Schématické uspořádání procesů mletí na nožovém a ultraodstředivém mlýně

Nejprve tedy dojde k mletí vzorku na samotném nožovém mlýně a bude pozorováno, zda kvalita výsledného produktu odpovídá kvalitě reference. Nožový mlýn je zvolen jako první v sérii pokusů především proto, že je schopen zvládat velké objemy produkce a má snazší manipulaci. Dále je testována kombinace mlýnů nožového a ultraodstředivého, kdy se zjišťuje, do jaké míry je možné korigovat výstupní produkt z nožového mlýnu. A nakonec je třeba ověřit, zda je možné mlít cvrčka domácího přímo bez jakékoli úpravy na samotném ultraodstředivém mlýnu.

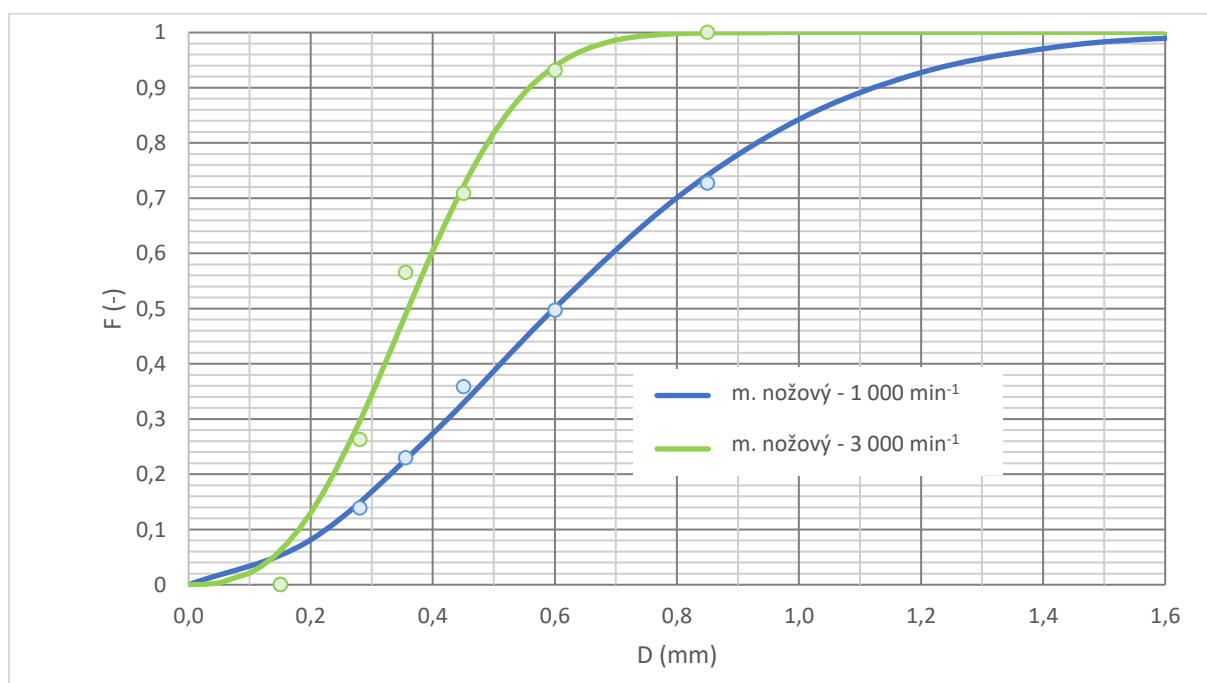
#### 4.3.1. Nožový mlýn

Konfigurace pracoviště u nožového mlýnu vypadala jako na Obr. 40. Do mlýnu je vložen tří-břítý typ rotoru, který společně se střížnými lištami rozmělnjuje vstupující hmotu. Výrobce uvádí, že rotor generuje 9 střížných momentů na otáčku [42]. Dále je v komorové části umístěno síto s velikostí trapezoidních otvorů 0,5 mm, které pomáhá selektovat částice s příliš velkým rozměrem. Částice jsou odváděny do cyklónu napojeného na vysokovýkonný vysavač, který současně tvoří podtlak za pracovní komorou, pomáhá tak kontinuálnímu odvodu částic a brání hromadění zrněk v mlecí komoře.



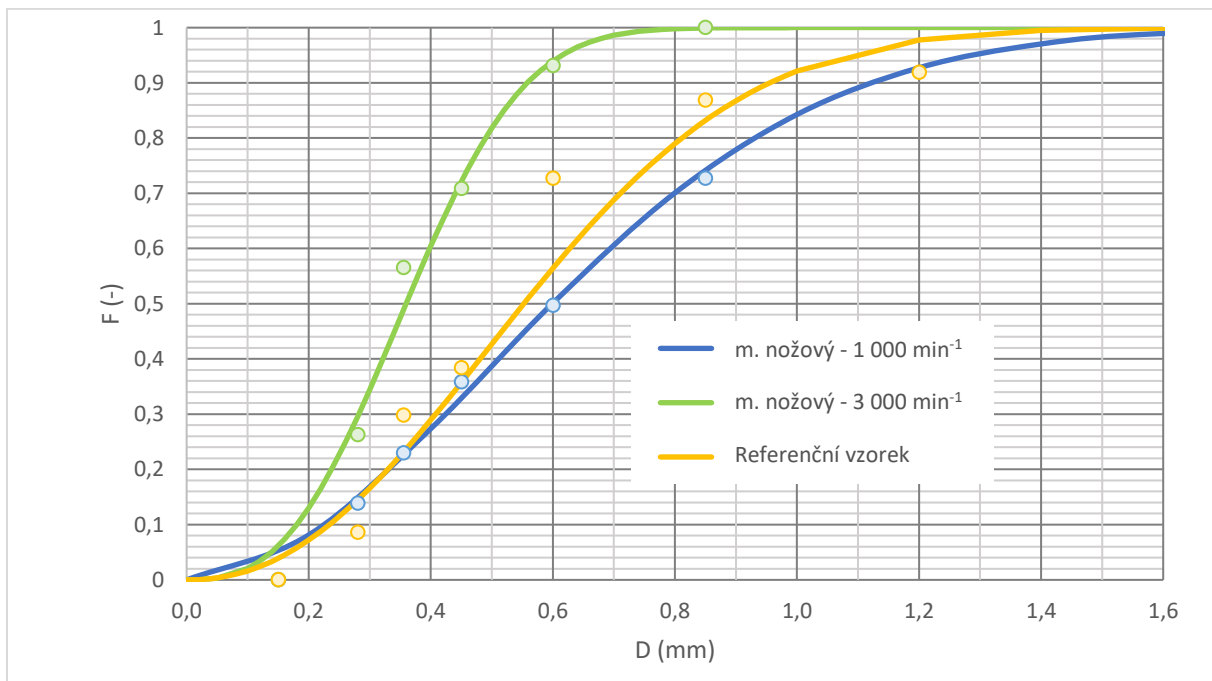
Obr. 40: Konfigurace nožového mlýna Retsch SM 300 [42]

Na nožovém mlýnu byla provedena dvě měření při limitních stavech nastavení otáček. Důvodem je stanovení vhodné meze nastavení otáček tak, aby bylo zřejmé, kde se může seřízení mlýnu pohybovat bez změny požadované jakosti produktu. První limitní stav byl při  $1000 \text{ min}^{-1}$  a druhý při  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Diagram kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti je vyjádřen Obr. 41.



Obr. 41: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti limitních stavů nožového mlýnu

Z grafu lze vysledovat posun zelené křivky vlevo, reprezentující podmínky mletí při  $3\,000\text{ min}^{-1}$ , což vypovídá o hromadění jemnější frakce na sítích v nižších patrech. To znamená, že výsledný produkt obsahuje větší podíl menších částic a je tedy celkově jemnější. Kumulativní křivka je tedy štíhlejší. V následujícím diagramu jsou oba vzorky srovnány s referencí z předchozí kapitoly. Ze zobrazení lze vyčíst, že žlutá a modrá křivka se drží společně do hodnoty okolo 0,3 na ose y, kdy se žlutá začíná pozvolna oddělovat směrem vlevo. Modrá křivka se drží od počátečních hodnot vpravo od žluté křivky. To značí větší podíl hrubší frakce v měřeném vzorku pro modrou křivku a menší podíl hrubší frakce pro zelenou křivku vzhledem k referenčnímu vzorku. To znamená, že horní limitní stav nastavení otáček ( $3\,000\text{ min}^{-1}$ ) splňuje požadovanou kvalitu produktu, dokonce je výrazně kvalitnější, zatímco dolní hranice nedosahuje požadovaných kvalit.



Obr. 42: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti limitních stavů nožového mlýna a referenčního vzorku

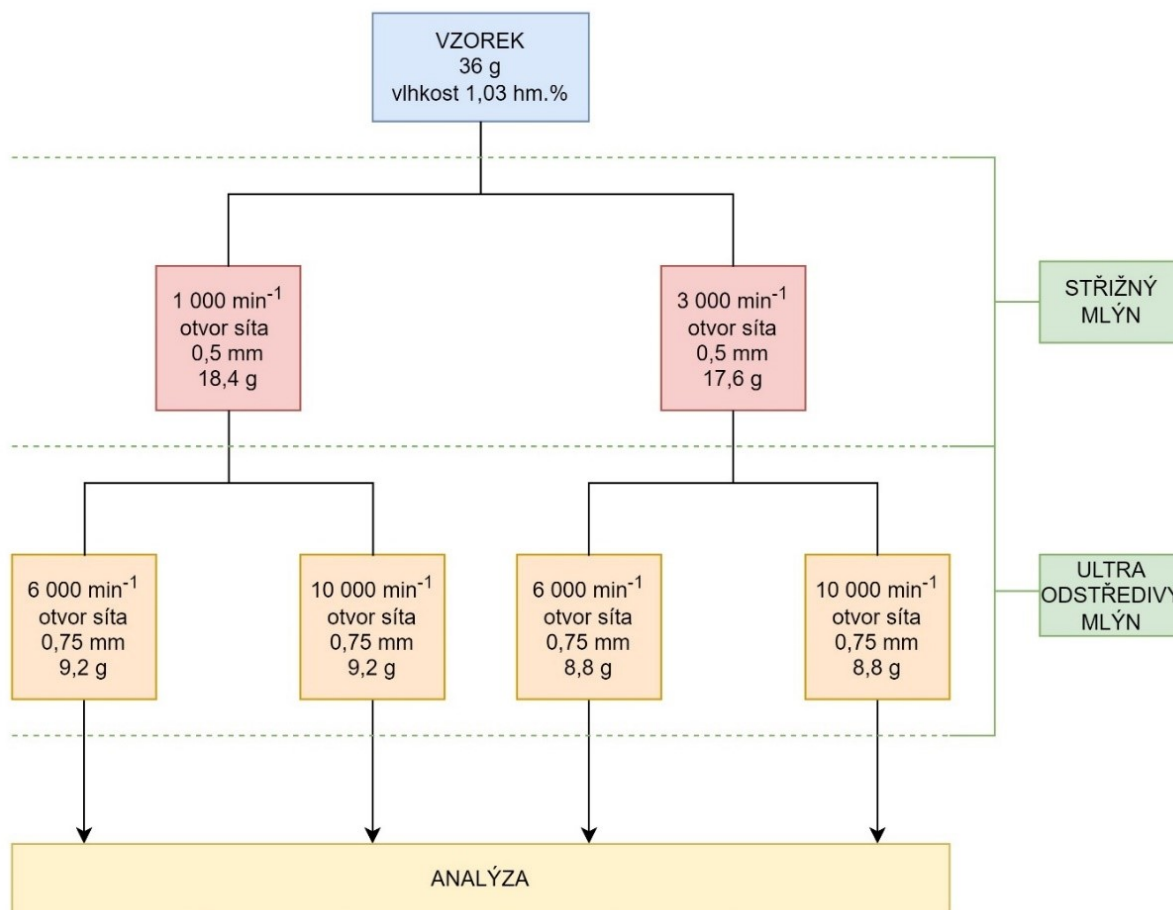
Pro lepší představu byly k hodnotě  $D_{50}$  přidány i hodnoty  $D_{10}$  a  $D_{90}$ . Pro přehlednost jsou všechny parametry shrnuty v Tab. 7.

Tab. 7: Srovnání hlavních parametrů daných vzorků

	m. nožový 1 000 min <sup>-1</sup>	m. nožový 3 000 min <sup>-1</sup>	referenční vzorek
$D_{10}$ (mm)	0,224	0,180	0,234
$D_{50}$ (mm)	0,599	0,360	0,552
$D_{90}$ (mm)	1,121	0,558	0,955

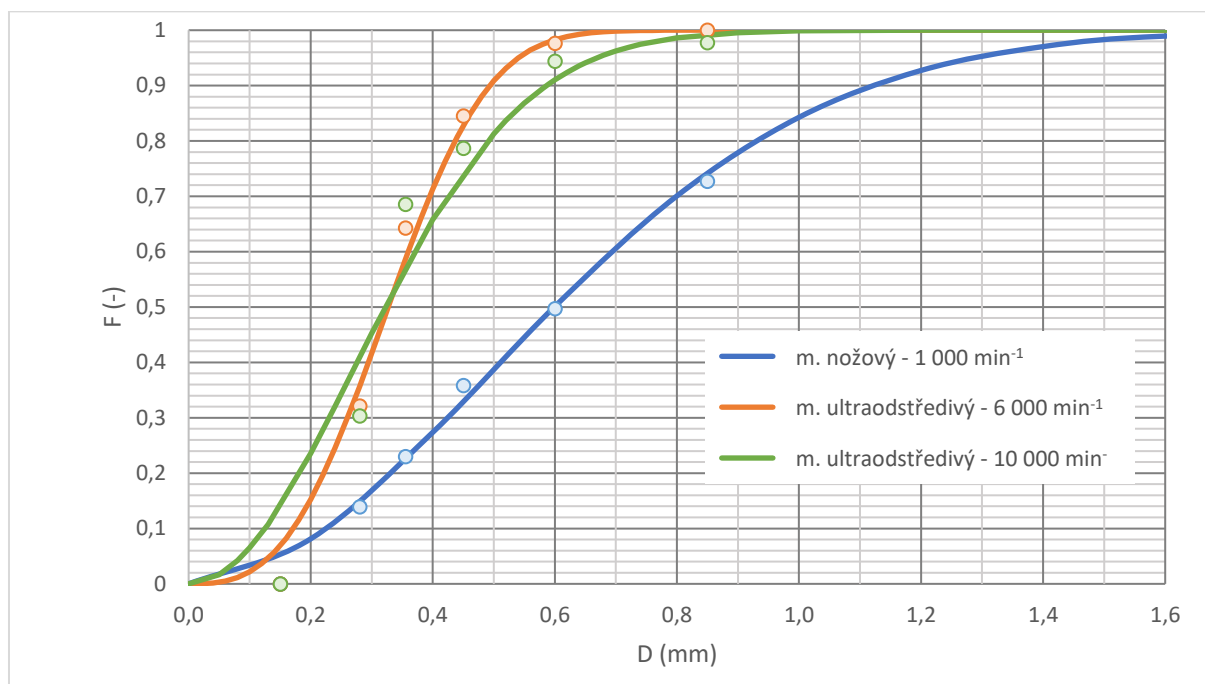
#### 4.3.2. Kombinace nožového a ultraodstředivého mlýnu

Následuje měření na kombinaci mlýnů nožového a ultraodstředivého. Všechna měření probíhala stejným způsobem jako je tomu v předchozí kapitole. Tedy proběhla síťová analýza vzorků na vibračním stroji JBS IVEX, VP 200, následně proběhlo zanesení dat do dvourozměrných souřadnic a proložení vhodným matematickým modelem RRSB. Všechna tato měření probíhala mezi jednotlivými kroky daných procesů. K ověření této varianty bylo stanoveno nové měření dle následujícího schématu na Obr. 43. Vzorek o vlhkosti 1,03 hm.% byl rozdělen na dvě části, které byly za rozdílných podmínek semlety na střížném mlýnu Retsch SM 300. Následovalo další dělení výsledného meziprojektu vždy na dvě části. Tím byly získány čtyři vzorky, jež se dále zpracovávaly za rozdílných podmínek na ultraodstředivém mlýnu Retsch ZM 200. Po ukončení těchto procesů, kdy výstupem jsou čtyři vzorky, dojde ke kompletaci výsledků a podrobnému vyhodnocení dat.



Obr. 43: Schéma měření pro zpřesnění hypotézy mletí

Nejdříve byla vyhodnocena levá část schématu, tedy hodnoty, kdy vzorek své zpracování začíná v mlýnu s nastavením na 1 000 min<sup>-1</sup>. Diagram jednotlivých distribučních křivek je zobrazen na Obr. 44.



Obr. 44: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti pro kombinaci mlýnů s počáteční hodnotou 1 000 min<sup>-1</sup>

Na těchto křivkách je vidět vhodné rozložení, jak tomu bylo v případě nožového mlýnu, tedy že vzorek namletý na vyšší otáčky má větší podíl jemnější frakce a drží se tak nalevo od modré křivky, tedy křivky po prvním mletí. Obě křivky naměřené po druhém stupni mletí (zelená a oranžová) se z velké části překrývají, kdy zelená křivka má větší podíl jemnější frakce ve spodních sítích, zatímco oranžová má celkově větší podíl jemnějších částic ve vyšších patrech. Střední hodnotu absolutního podílu jemné frakce však prozradí až hodnota  $D_{50}$ , která by měla být v součtu nižší u mlýnu s vyššími otáčkami.

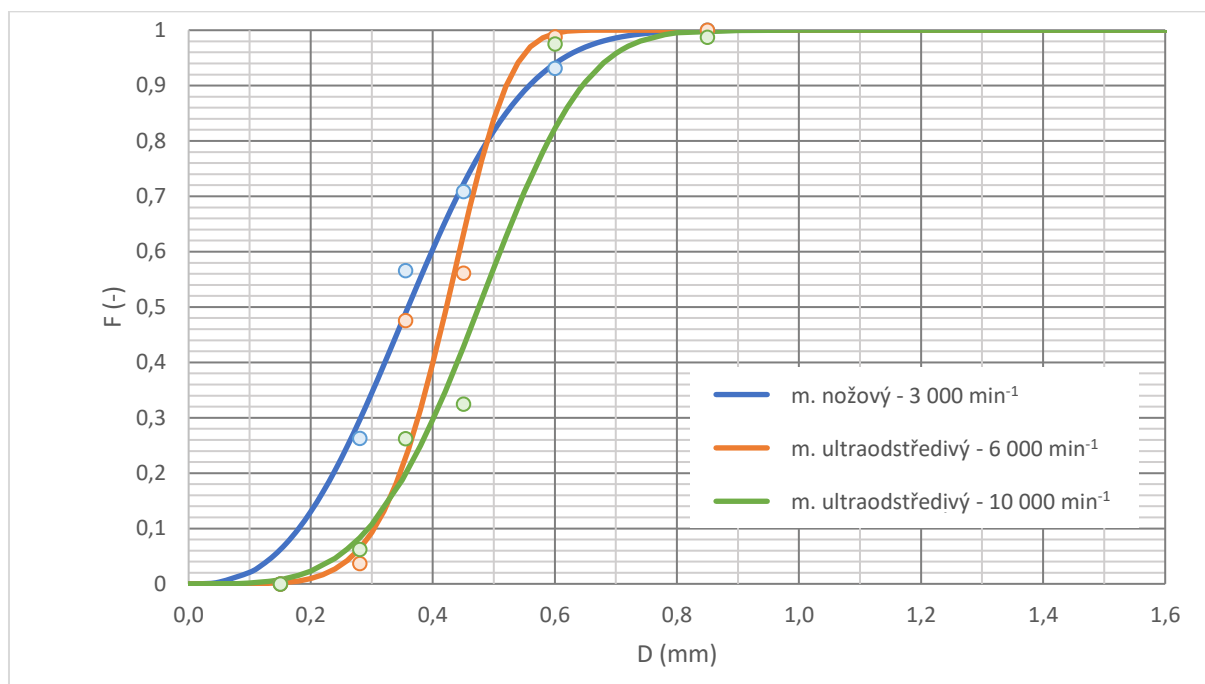
Tab. 8: Srovnání parametrů daných vzorků

	m. nožový 1 000 min <sup>-1</sup>	m. ultraodstředivý 6 000 min <sup>-1</sup>	m. ultraodstředivý 10 000 min <sup>-1</sup>
$D_{10}$ (mm)	0,224	0,171	0,125
$D_{50}$ (mm)	0,599	0,327	0,321
$D_{90}$ (mm)	1,121	0,494	0,586

Hypotéza byla potvrzena a je zřejmé, že touto kombinací bude dosaženo nejvyšší kvality vzorku v případě dvoustupňového mletí s nastavením druhého stupně na 10 000 min<sup>-1</sup>.

Následně byla vyhodnocena pravá část schématu, tedy hodnoty, kdy vzorek své zpracování začíná v mlýnu s nastavením na 3 000 min<sup>-1</sup>. Diagram jednotlivých distribučních křivek je na Obr. 45.





Obr. 45 Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti pro kombinaci mlýnů s počáteční hodnotou 3 000 min<sup>-1</sup>

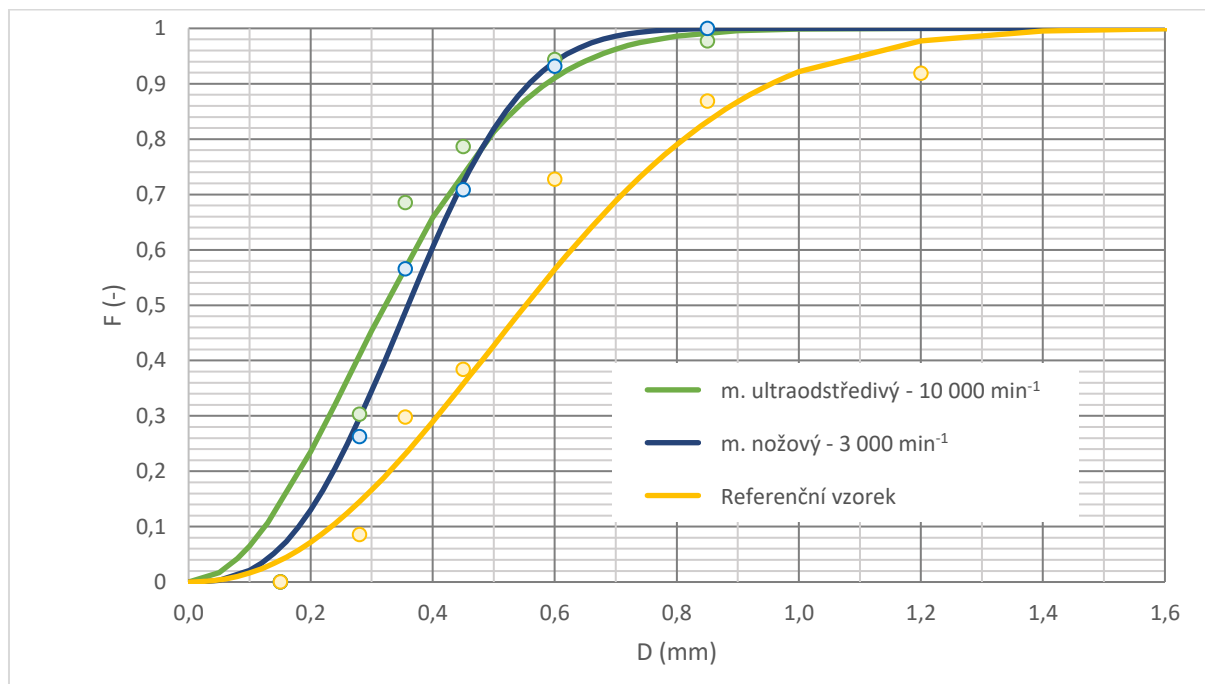
Z těchto křivek lze vyčíst nesourodé hodnoty druhých stupňů, které vycházejí v porovnání s prvním stupněm mletí jako hrubší, což může být ovlivněno různými faktory. Například dvoudenní rozestup mezi mlecími procesy, kdy dojde k navlhnutí vzorku, který byl následně zpracováván. Dalším důvodem může být vysoká jemnost meziprojektu, který vstupuje do ultraodstředivého mlýnu, čímž při zpracování dojde spíše ke zhutnění jednotlivých částic do sebe. Také je možné, že částice výsledného produktu nemají ideální tvar koule, ale blíží se spíše jehlicím. To způsobí horší měřitelnost a závislost množství propadu na natočení ostnu, čímž jsou znatelně zkresleny výsledky a není možné efektivně měřit propad sítý.

Při porovnání střední hodnoty jemné frakce a minimální velikosti částic lze pozorovat stejně nesouvislé výsledky. Je vidět, že se vrůstajícími otáčkami paradoxně roste podíl hrubší frakce ve vzorku. To může být způsobeno jednou z výše zmíněných příčin nebo jejich kombinací.

Tab. 9: Srovnání percentile daných vzorků

	m. nožový 3 000 min <sup>-1</sup>	m. ultraodstředivý 6 000 min <sup>-1</sup>	m. ultraodstředivý 10 000 min <sup>-1</sup>
D <sub>10</sub> (mm)	0,180	0,304	0,294
D <sub>50</sub> (mm)	0,360	0,422	0,475
D <sub>90</sub> (mm)	0,558	0,520	0,645

Pokud jsou srovnávány nejjemnější frakce z obou měření (levá a pravá strana) s referenčním vzorkem, kterými jsou dvoustupňové mletí na ultraodstředivém mlýnu při  $10\,000\text{ min}^{-1}$  a jednostupňové mletí na nožovém mlýnu při  $3\,000\text{ min}^{-1}$ , bude rozložení doby zdržení následující.



Obr. 46: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti nejjemnějších nastavení z kombinace mlýnů a referenčního vzorku

Z výše uvedeného diagramu vyplývá, že pokud by oba uvedené vzorky měly být finálním produktem celého procesu, splňují svou kvalitou stanovené požadavky. Důvodem je posun obou křivek vlevo vzhledem ke křivce referenční. Je však vidět, že druhý stupeň mletí už výrazně nezvýší jemnost požadovaného produktu. Je proto na zvážení, zda využít dvoustupňové mletí.

#### 4.3.3. Ultraodstředivý mlýn

Konfigurace pracoviště u nožového mlýna vypadala jako na Obr. 47. Částice jsou skrze trychtýř přiváděny do středu mlecí komory, kde jsou díky rotujícímu disku unášeny dále od středu. Tam narážejí na malé zuby, které rázově a smykem dělí částici na více kusů. Ta je pak dále odváděna skrze síto do sběrného disku. Mlecí komora je osazena 12zubým rotorem a kruhovým sítem o rozměrech ok 0,75 mm. Okolo mlecí komory je nasazena vsádková kazeta, do které je skrze síto přiváděn zpracovaný produkt. Materiál je třeba do mlýnu přivádět velmi pozvolna vzhledem k velké disipované energii. Ta se při takto skokové změně uvolňuje a dochází k velkým teplotním změnám, při kterých by mohlo dojít k zahoření materiálu.

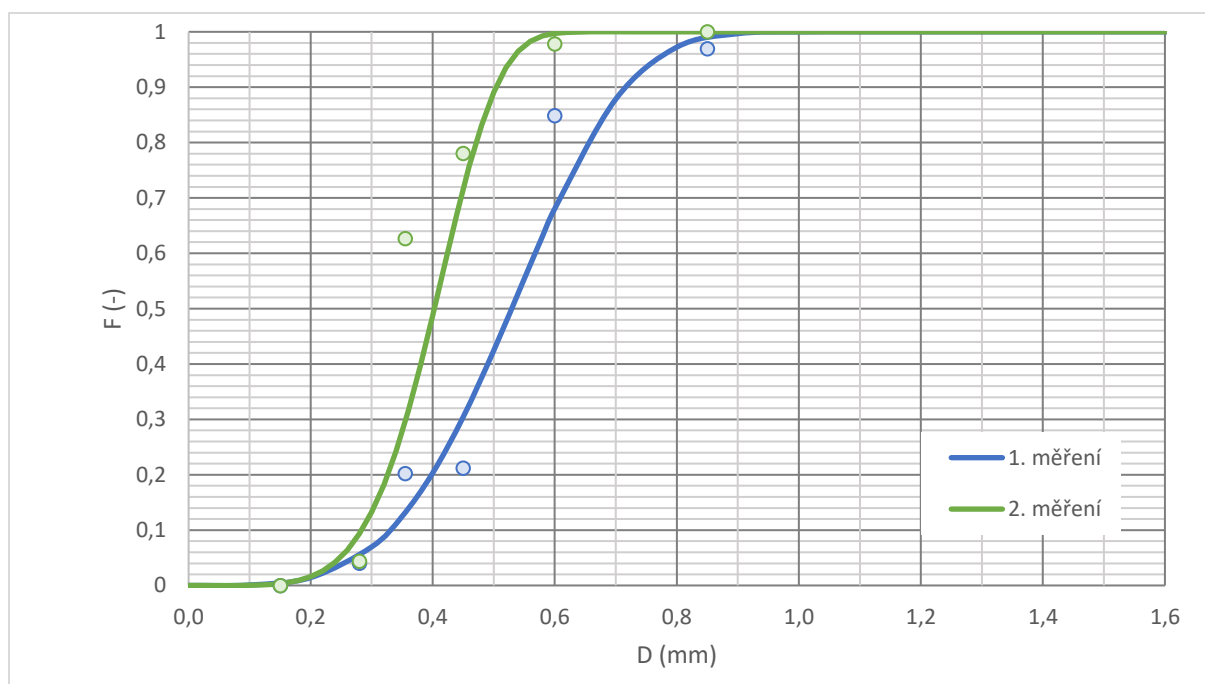


Obr. 47: Konfigurace ultraodstředivého mlýnu Retsch ZM 200



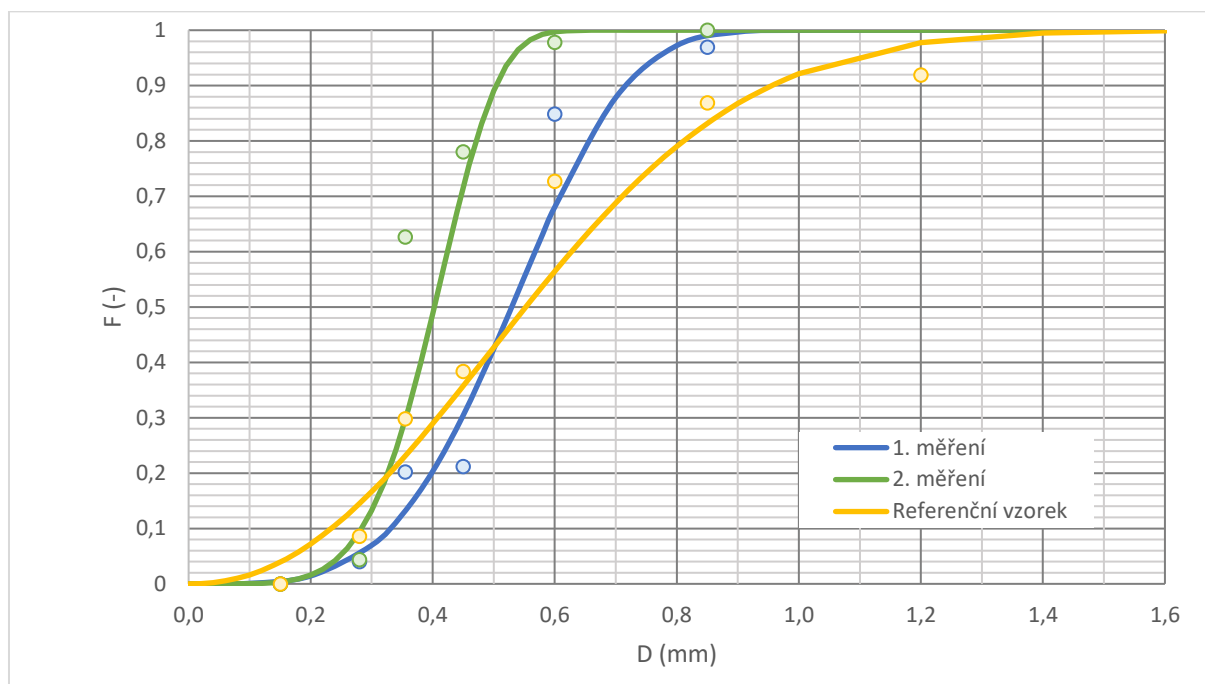
Obr. 48: Ultraodstředivý mlýn Retsch ZM 200 po skončení mletí

Přímé mletí cvrčků na ultraodstředivém mlýnu je závěrečným pokusem, jak nalézt optimální nastavení mlýnu, tak, aby byl schopen na minimální počet opakování a s nejvyšším stupněm jemnosti namlít mouku ze cvrčka domácího. Při této technologii zpracování dochází k vysokému stupni dezintegrace částice, kdy v průměru z 15 mm tělíčka cvrčka na vstupu dojde k rozpojení a změně na částice o rozměrech pár desetin milimetrů. V laboratoři byla provedena dvě měření, která měla prokázat vhodnost použití. Oba tyto pokusy proběhly za totožných podmínek, a to při  $10\,000\text{ min}^{-1}$  a stejné velikosti otvorů v propadovém sítu 0,75 mm. Obě měření jsou znázorněna na následujícím grafu.



Obr. 49: Křivky kumulativního rozložení velikosti částic dle hmotnosti obou pokusů mletí na ultraodstředivém mlýnu při  $10\,000\text{ min}^{-1}$

Z diagramu je patrný nápadně podobný tvar a průběh distribučních křivek, které se liší posuny svých horních částí, kdy je zelená křivka odkloněna více vlevo. To vypovídá o větším podílu jemnějších částic v celku vzhledem k modré křivce. Odchylna může být způsobena zvýšenou vlhkostí ve vzorku a tendencí k lepení částic mezi sebou při třasavém pohybu vibračního stroje. Pokud budou obě křivky srovnány s referenčním vzorkem, bude možné graficky posoudit jejich kvalitu a výsledek bude následující.



Obr. 50: Kumulativní křivky rozložení velikosti částic dle hmotnosti obou pokusů mletí na ultraodstředivém mlýnu a referenčního vzorku

Obě křivky pro rozložení doby zdržení na ultraodstředivém mlýnu se po většinu své dráhy drží vlevo od referenčního vzorku, což vypovídá o větším podílu jemné složky oproti referenci, a tedy i o vyšší kvalitě výsledného produktu.

Při bližším srovnání percentilů  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  a  $D_{90}$  v tabulce níže je vidět, že obě hodnoty  $D_{50}$  jsou opravdu menší než referenční a splňují tak požadovanou kvalitu.

Tab. 10: Srovnání percentile daných vzorků

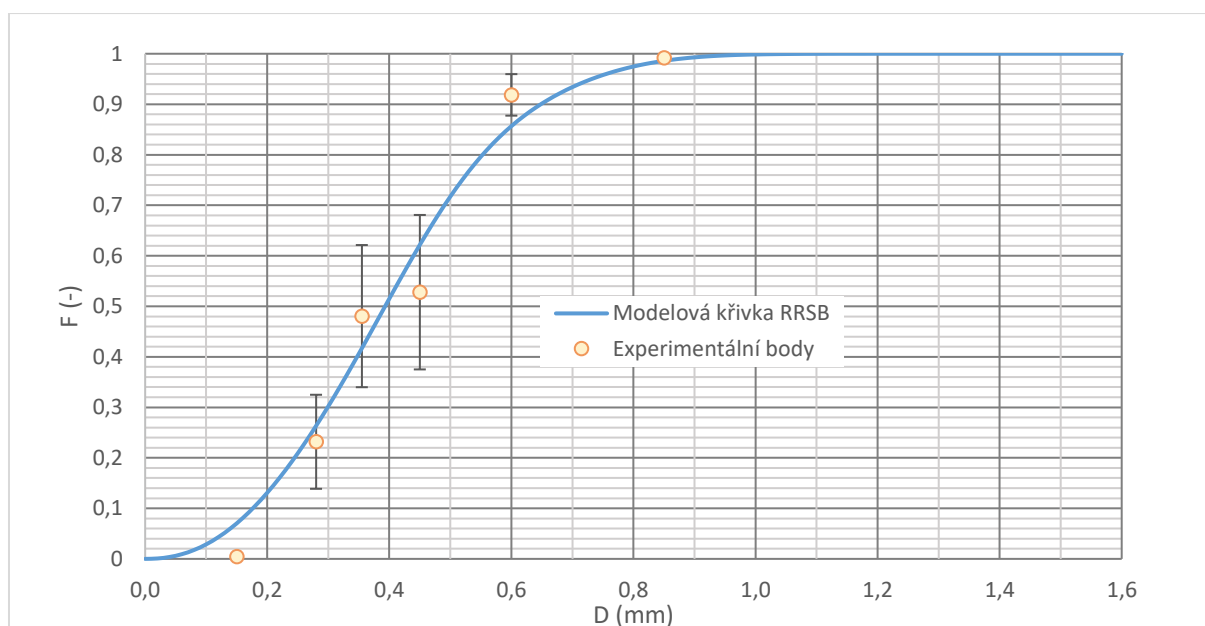
	1.měření ultra. 10 000 min <sup>-1</sup>	2. měření ultra. 10 000 min <sup>-1</sup>	referenční vzorek
$D_{10}$ (mm)	0,330	0,284	0,234
$D_{50}$ (mm)	0,529	0,403	0,552
$D_{90}$ (mm)	0,716	0,504	0,955

Kvalitu výsledného produktu na ultraodstředivém mlýnu je možné zvýšit pomocí zapojení podtlaku a kontinuálním odvodem materiálu.



#### 4.3.4. Chyba měření

Během předchozích měření, jak na ultraodstředivém tak na nožovém mlýnu, bylo zaznamenáno mnoho neodpovídajících měření s relativně vysokou chybou. To je způsobeno různými faktory, např. lidskou vnesenou chybou při manipulaci, tak také nevhodným chováním materiálu. Každý materiál má svá specifika a mnohdy je velmi náročné jej konvenčními postupy vhodně změřit. V případě cvrččí mouky není možné využít měření velikosti částic na ultrazvuku, který funguje pro dispergaci vzorku v kapalině. Důvodem je obsah lipidů, které jsou rozpustné v nepolárních rozpouštědlech, a zároveň obsah vlákniny, která bobtná v rozpouštědlech polárních. Oba tyto efekty by zvětšovaly chybu měření, je proto nutné zvolit suchý způsob, jakým je již dříve zmíněná síťová analýza. Na následujícím diagramu je možné vidět chybu na základě 3 měření s totožnými podmínkami, kdy byl vzorek semlet ve dvou stupních, nejdříve při  $3\,000\text{ min}^{-1}$  na nožovém mlýnu a následně při  $10\,000\text{ min}^{-1}$  na mlýnu ultraodstředivém.

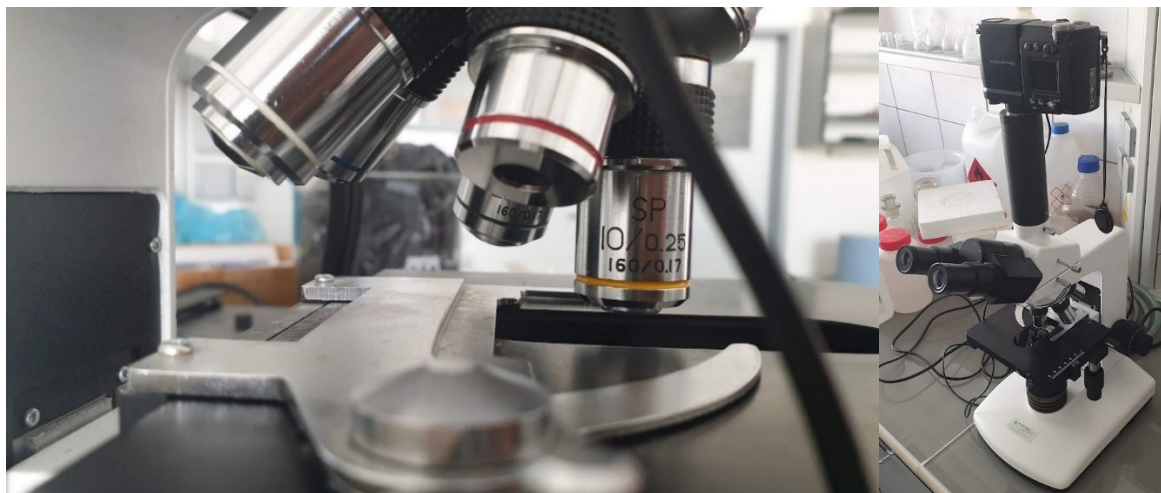


Obr. 51: Chybové úsečky ve formě směrodatné odchylky kombinace mlýnů za stejných podmínek



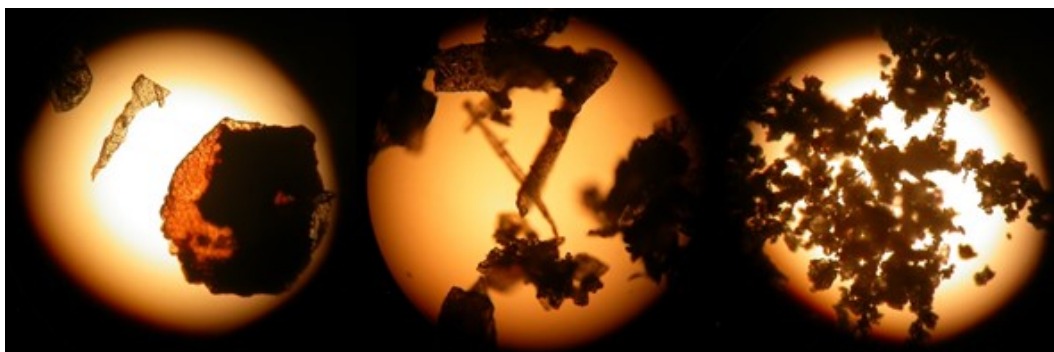
#### 4.3.5. Mikroskopická analýza částic

K plnému pochopení chování materiálu byla provedena mikroskopická analýza jednotlivých vzorků. Ta probíhala na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT OSL 3000, kdy byly vzorky pozorovány při totožném rozlišení pomocí optické čočky SP 10/0.25; 160/0.17, která je zachycena na Obr. 52. Práce se vzorkem probíhala pomocí jemného rozprášení prášku na sklíčko tak, aby byla jednotlivá zrna vzorku separována. To pomáhalo k lepší identifikaci a jasnému vymezení hranic zrna.



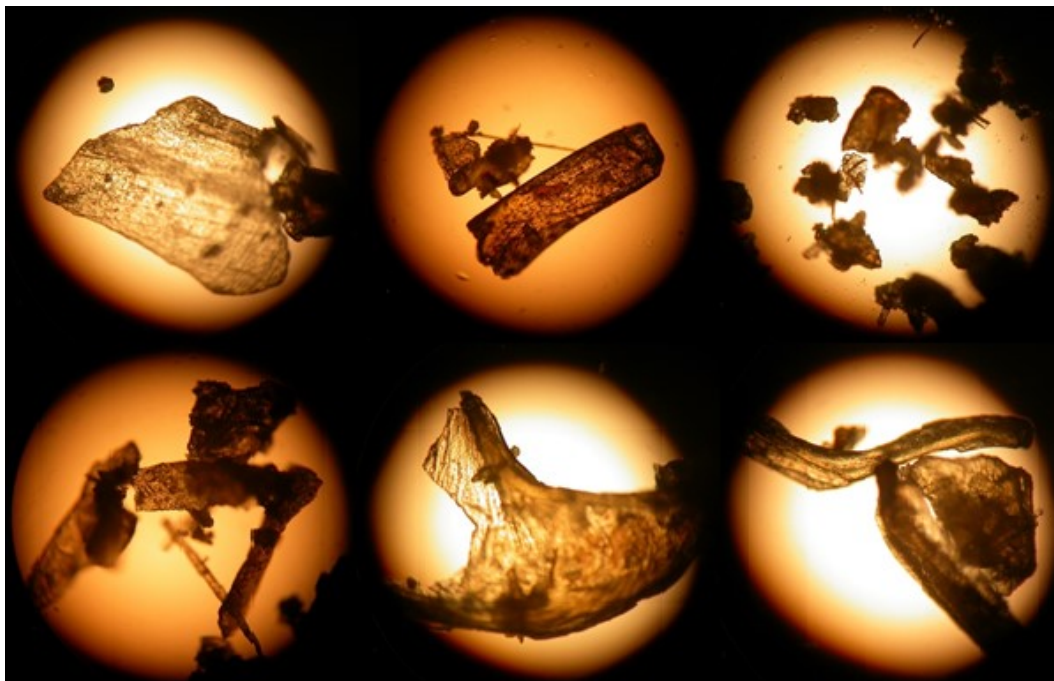
*Obr. 52: Detailní záběr na optickou čočku SP 10/0.25; 160/0.17 a nastavení mikroskopu Olympus LEXT OSL 3000*

V průběhu mletí byla posuzována velká škála vzorků. Zrna byla různorodá, byly pozorovány nepravidelné úlomky křídel, nožiček, krovek a neurčité tvary vnitřností a jiných orgánů. Nelze tedy jednoduše tvarově popsat typickou částici. To je možné pozorovat na obrázku níže. Součástí analýzy bylo i posouzení referenčního vzorku, což prokázalo vysokou jemnost a relativní pravidelnost vzorku. To je pravděpodobně způsobeno rozdílnou metodou mletí, kdy v průmyslovém měřítku je nejvíce rozšířena právě mokrá metoda, tedy zpracování v koloidním mlýnu a následné sušení v rozprašovací sušárně.



*Obr. 53: Zleva křídlo a část krunýře, nožička, jemné částice referenčního vzorku od společnosti SENS (větší přiblížení)*

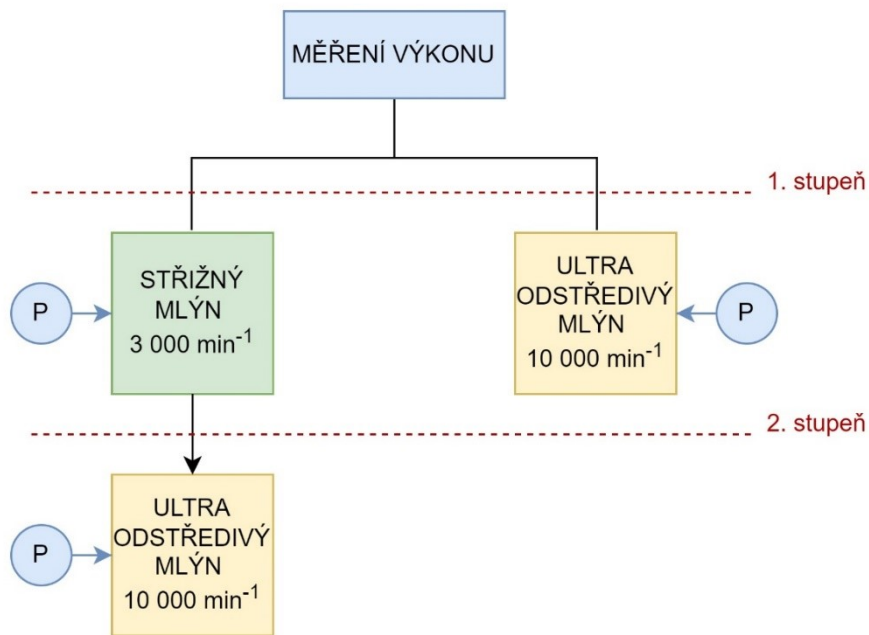
S určitostí lze však konstatovat, že materiál je velmi pružný a ani přes vysoký stupeň usušení a téměř nulovou vlhkost nepraská. To potvrzuje, že rozpojování částic úderem není efektivní a nejlépe se v tomto směru uplatní způsoby stříhu a smyku, což bylo konkrétně popsáno v předchozích kapitolách.



*Obr. 54: Přehled rozmanitosti tvarů z mikroskopické analýzy*

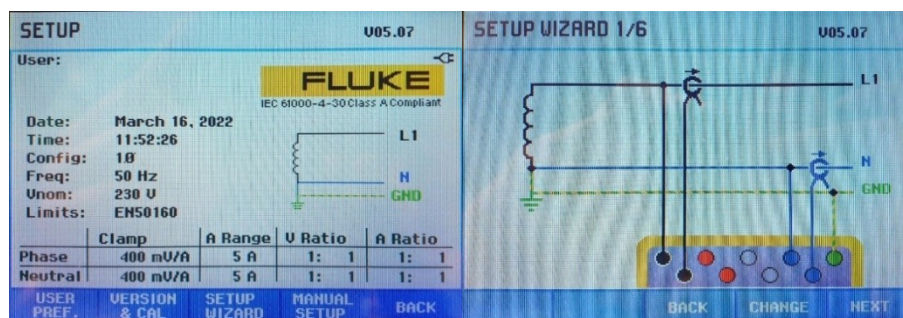
#### 4.3.6. Energetická náročnost rozpojení

V procesu byla měřena i energetická náročnost rozpojení částic, a to jak v sériovém zapojení nožového a ultraodstředivého mlýnu, tak pouze v mlýnu ultraodstředivém viz přehledné schéma na Obr. 55. Důvodem je nalezení základních parametrů, které mohou být následně využity k nalezení vhodných komerčních produktů při výběru na trhu.



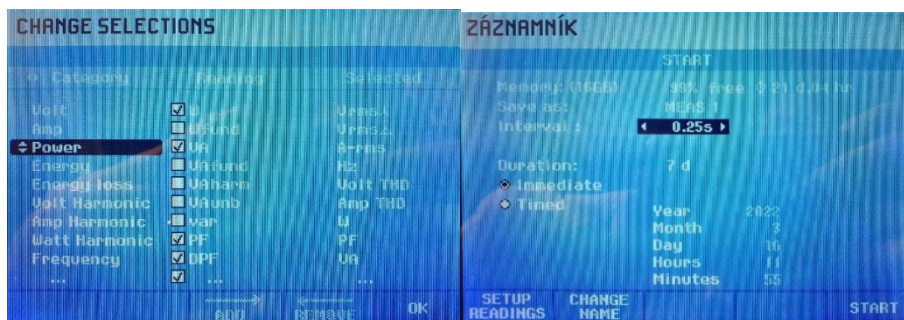
Obr. 55: Schéma měření výkonu

K měření výkonu byl použit multifunkční Analyzátor Fluke 438 II, který v tomto případě slouží jako wattmetr (viz. zapojení na Obr. 56). Ten určuje činný výkon stroje na základě měření proudu, napětí a účinníku (fázového posunu) v čase. Na následujícím obrázku je vidět typ zapojení přístroje a počáteční podmínky nastavení.



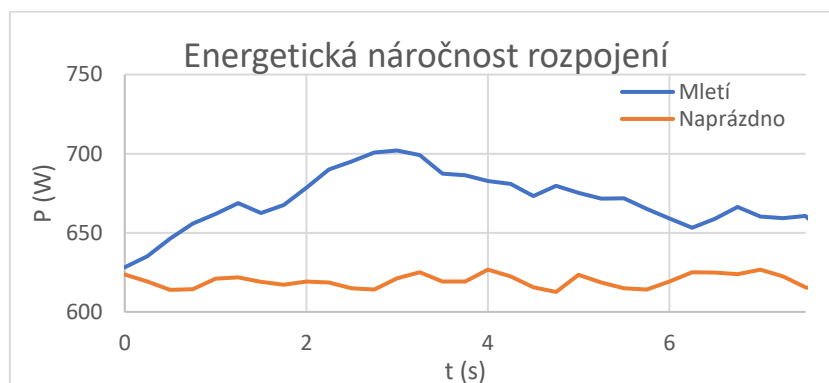
Obr. 56: Zapojení přístroje Fluke 438 II s počátečními podmínkami měření

Během měření byla nastavena doba snímání výkonu s periodou 0,25 s, jak je to vidět na obrazovce záznamníku na Obr. 57.



Obr. 57: Obrazovky záznamníku a nastavení měřených podmínek přístroje Fluke 438 II

První byla měřena kombinace mlynů nožového a ultraodstředivého. První stupeň měření byl proveden na nožovém mlynu a výstupní charakteristika měla následující průběh. Nejdříve bylo provedeno měření výkonu naprázdno, to znamená při pracovních otáčkách, bez pracovní zátěže. To v tomto případě znamená bez vhozeného materiálu. Rozdíl obou křivek je patrný na následujícím grafu.



Obr. 58: Energetická náročnost rozpojení nožového mlynu

Dále byl měřen potřebný výkon pro dezintegraci již zpracovaného produktu z nožového mlynu na mlynu ultraodstředivém při  $10\,000\text{ min}^{-1}$ . Následuje průběh aktuálních hodnot výkonu.



Obr. 59: Energetická náročnost rozpojení částic na ultraodstředivém mlynu po průchodu mlynem nožovým



Nakonec byl naměřen výkon potřebný k rozemletí vysušeného cvrčka domácího napřímo v ultraodstředivém mlýnu při  $10\,000\text{ min}^{-1}$ .



Obr. 60: Energetická náročnost rozpojení částic na ultraodstředivém mlýnu při přímém průchodu cvrčka domácího

V porovnání obou pracovních křivek na Obr. 59 a na Obr. 60 je možné pozorovat rozdílný průběh, kdy při mletí cvrčka napřímo dochází k větším výkyvům hodnot a plocha nad oranžovou křivkou se tak zdá být větší. To je způsobeno větší nutnou disipací energie k rozpojení tělíčka cvrčka, což dle obou diagramů naprosto odpovídá jak teoreticky, tak i prakticky. Podrobné hodnoty jsou vidět v následující tabulce.

Výpočet celkové energie nutné na dezintegraci propadávajících částic je následující. Střední výkon za dobu jedné periody je definován vztahem.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt \quad (8)$$

Kde  $p$  je okamžitý výkon a  $T$  je doba jedné periody. Elektrickou energii lze tedy spočítat z následujícího vzorce.

$$E = \int_0^T p \cdot dt \quad (9)$$

Energie naprázdno je pak definována následujícím vztahem.

$$E_{\text{naprázdno}} = \int_0^T p_{\text{naprázdno}} \cdot dt \quad (10)$$

Kde symbol  $E_{\text{naprázdno}}$  je střední hodnota elektrické energie naprázdno a  $p_{\text{naprázdno}}$  je aktuální hodnota, která charakterizuje výkon stroje při daných podmínkách bez jakékoli zátěže.

Celkovou hodnotu rozpojovací energie je možné dostat prostým rozdílem předchozích dvou rovnic.

$$E_{rozpoj.} = \Delta E = E - E_{naprázdno} \quad (11)$$

Tento vztah v podstatě popisuje rozdíl plochy pod modrou křivkou – pracovní a křivkou oranžovou – naprázdno.

Tab. 11: Tabulka energií jednotlivých způsobů mletí

	Hmotnost vzorku [g]	Doba měření [s]	Hmotnostní tok [kg/h]	Rozpojovací energie [kWh/t]
Nožový mlýn	34,4	7,8	15,88	<b>3,21</b>
Ultraodstředivý mlýn	30,5	25,03	4,39	<b>6,35</b>
Ultraodstředivý mlýn	45,9	45,9	3,60	<b>9,73</b>

Tabulka potvrzuje předchozí teoretickou hypotézu, že by měl ultraodstředivý mlýn, který zpracovává cvrčky přímo, mít větší energetickou náročnost. Dokonce svou hodnotou převyšuje i potřebnou energii nožového mlýnu. Avšak pokud budeme srovnávat ultraodstředivý mlýn s tandemem nožového a ultraodstředivého, jsou již hodnoty srovnatelné, i když přímá varianta stále lehce převažuje svou energetickou náročností. To může být způsobeno nepřesností měření, která se v tomto případě pohybuje okolo 30–40 %. Důvodem je nízká hmotnost měřeného vzorku, kdy objem byl limitován cenovou dostupností. Obě varianty tedy vychází energeticky téměř stejně, z tohoto důvodu dává ekonomicky větší smysl zapojit do procesu pouze mlýn ultraodstředivý, který má nižší investiční náklady.



## 5. Závěr a výsledky

Cílem této diplomové práce bylo posoudit kvalitativní konkurenceschopnost suché technologie oproti průmyslově používané mokré technologii. Tohoto cíle bylo dosaženo díky nalezení dvou jednostupňových způsobů mletí, a to na mlýnu ultraodstředivém a nožovém. Oba tyto způsoby mletí splňují stanovené způsoby dezintegrace částic, a to úder, otěr, stříh a smyk. Nalezené technologie mletí mají své výhody a nevýhody.

- Ultraodstředivý mlýn
  - Vyšší investiční náklady, menší hmotnostní tok, vyšší podíl jemné frakce
  - Velikost otvorů síta 0,75 mm; zapojení bez podtlaku za komorou
  - Rozpojovací energie 10kWh/t, obvodová rychlost rotoru 105 m/s, konfigurace rotoru: 12 zubový, průtok 4 278 kg/m<sup>2</sup>h
- Nožový mlýn
  - Nižší investiční náklady, vyšší hmotnostní tok, nižší podíl jemné frakce
  - Velikost otvorů síta 0,5 mm; zapojení s pod tlakem za komorou
  - Rozpojovací energie 4kWh/t, obvodová rychlost rotoru 42 m/s, konfigurace rotoru: 3 nože a 3 dvoubřité nože statoru, průtok 14 827 kg/m<sup>2</sup>h

Pro menší nároky na jemnost produktu lze doporučit mlýny nožové, u kterých je snazší obsluha a snesou horší zacházení.

V prvotní rozvaze bylo navrženo PFD schéma obou procesů a byly vzájemně porovnávány vzhledem k počtu zařízení. Suchá metoda zahrnovala pouze 8 zařízení oproti mokré, která disponovala 13 zařízeními. To nejen usnadňuje obsluhu linky a ergonomii práce, ale zároveň zvyšuje spolehlivost celého procesu. Také jsou zde nižší investiční náklady jen z prostého porovnání počtu strojů, bez ohledu na nesrovnatelně vyšší samotné náklady na dané stroje u mokré technologie.

V budoucnu je nezbytné vyřešit stabilitu produktu a konzervaci. Ani jeden z těchto problémů nebyl cílem práce, ale hraje zásadní roli při zavádění produktu na trh. Životnost produktu značně zvedá jeho potenciál, je však třeba dbát na šetrnost konzervantu vůči zákazníkovi. Proto je žádoucí najít rovnováhu mezi zdravím a trvanlivostí. Mohla by být využita např. vakuová technologie. To je však jen odhad, který by mohl být zase energeticky náročný a produkt tak nakonec zdražovat. Vše by bylo třeba posoudit v další studii.

Závěrem je důležité zmínit, že cílem této diplomové práce nebylo jen hledání vhodných provozních podmínek a nastavení testovaných mlýnů, ale především pochopení celého procesu zpracování a chování materiálu. Úmyslem bylo také ukázat určitý přesah vnímání

cvrčka domácího nejen jako všedního živočicha či potraviny, ale především pak jako prostředku k udržitelnější budoucnosti a možnosti, jak pomáhat s problémy v zemích třetího světa, především pak s hladomorem.

## 6. Bibliografie

- [1] S. Rietschel, *Hmyz: klíč ke spolehlivému určování: 3 znaky*, Dobřejovice: Rebo Productions CZ, 2004.
- [2] E. Kavaliauskas, „Flickr,“ 4 Červen 2021. [Online]. Available: <https://www.flickr.com/photos/dantux/51223416087/>. [Přístup získán 24 Červenec 2021].
- [3] H. J. O. Magara, S. Niassy, M. A. Ayieko, M. Mukundamago and J. P. Egonyu, “Edible Crickets (Orthoptera) Around the World: Distribution, Nutritional Value, and Other Benefits—A Review,” *Frontier in Nutrition*, 2021.
- [4] Ż. Zdanowska-Sąsiadek, J. Marchewka, J. Horbańczuk a A. Wierzbicka, „Nutrients Composition in Fit Snacks Made from Ostrich, Beef and Chicken Dried Meat,“ *Molecules*, č. 23, p. 1267, 2018.
- [5] ČR ÚZIS, „NZIP.cz,“ Ministerstvo zdravotnictví, [Online]. Available: <https://www.nzip.cz/clanek/1147-fosfor>. [Přístup získán 12 Březen 2022].
- [6] ČR ÚZIS, „NZIP,“ Ministerstvo zdravotnictví ČR, [Online]. Available: <https://www.nzip.cz/clanek/1143-mineralni-latky-pokryti-denni-potreby>. [Přístup získán 12 Březen 2022].
- [7] SÚKL, „Státní ústav pro kontrolu léčiv,“ 12 Prosince 2016. [Online]. Available: <https://www.sukl.cz/leciva/kategorie-vydeje-lecivych-pripravku-bez-lekarskeho-predpisu-1>. [Přístup získán 12 Březen 2022].
- [8] European Commission. Scientific Committee on Food, Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals, European Food Safety Authority, 2006.
- [9] R. Moawad, G. Mohamed, M. Ashour and M.-H. Enssaf, “Chemical Composition, Quality Characteristics and Nutritive Value of Goat Kids Meat from Egyptian Baladi Breed,” *Journal of Applied Science Research*, vol. IX, no. 8, pp. 5048-5059, 2013.
- [10] Y. Jongema, “Wageningen University & Research,“ Wageningen University & Research, 2012. [Online]. Available: <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Chair-groups/Plant-Sciences/Laboratory-of-Entomology/Edible-insects/Worldwide-species-list.htm>. [Accessed 29 Duben 2022].
- [11] M. Reverberi, “Edible insects: cricket farming and processing as an emerging market,“ 8 duben 2020. [Online]. Available: <https://www.wageningenacademic.com/doi/10.3920/JIFF2019.0052>. [Accessed 25 červenec 2021].
- [12] X. Fernandez-Cassi, A. Supeanu, M. Vaga, A. Jansson, S. Boqvist a I. Vagsholm, „The house cricket (*Acheta domestica*) as a novel food: a risk profile,“ *Journal of Insects as Food and Feed*, sv. V, č. 2, pp. 137-157, 2019.

- [13] science.ku.dk, „University Post,“ University of Copenhagen, 5 duben 2018. [Online]. Available: <https://uniavisen.dk/en/farmers-to-use-insects-as-their-new-livestock/>. [Přístup získán 25 červenec 2021].
- [14] Protifarm, “AgFunderNews,“ 12 prosinec 2019. [Online]. Available: <https://agfundernews.com/protifarm-raises-series-b-to-scale-robotized-beetle-tofu-farm.html>. [Accessed 25 červenec 2021].
- [15] A. Peters, “Fast Company,“ Fast Company, 6 říjen 2020. [Online]. Available: <https://www.fastcompany.com/90560222/the-worlds-largest-insect-farm-will-grow-hundreds-of-millions-of-beetles-for-eating>. [Accessed 27 červenec 2021].
- [16] A. Engström, „Bug Burger - äta insekter!,“ Bug Burger, 4 únor 2019. [Online]. Available: <https://www.bugburger.se/foretag/the-eating-insects-startups-here-is-the-list-of-entopreneurs-around-the-world/>. [Přístup získán 29 červenec 2021].
- [17] E. P. a. o. t. Council, “EUR-Lex,“ 11 prosinec 2015. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/reg/2015/2283/oj/eng>. [Accessed 27 červenec 2021].
- [18] A. v. Huis, Edible insects: future prospects for food and feed security, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
- [19] J. Kauppinen, House cricket (*Acheta Domesticus*) processing for food applications – focusing on drying and milling, Helsinki: University of Helsinki; Faculty of Agriculture and Forestry; Department of Food and Nutrition, 2019.
- [20] S. M. Kiiru, “In vitro Protein Digestibility and Textural Properties of High Moisture Extruded Cricket-Soy Meat Analogues,“ *Jomo Kenyatta university of agriculture and technology*, pp. 30-35, 2020.
- [21] R. P. Patel, “Indian Journal of Science and Technology,“ 20 říjen 2009. [Online]. Available: <https://indjst.org/articles/spray-drying-technology-an-overview>. [Accessed 5 srpen 2021].
- [22] Z. Kroupa, „Sušení biomasy,“ *Bakalářská práce*, pp. 17-18, 2017.
- [23] F. S. Bassett, “Comparison of Functional, Nutritional, and Sensory Properties of Spray-Dried and Oven-Dried Cricket (*Acheta domesticus*) Powder,“ 1 duben 2018. [Online]. Available: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/6790/>. [Accessed 5 srpen 2021].
- [24] M. N. Riaz, *Extruders in food applications*, Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2000.
- [25] J. A. Cortes Ortiz, A. T. Ruiz, J. A. Morales-Ramos, M. Thomas, M. G. Rojas, J. K. Tomberlin, L. Yi, R. Han, L. Giroud, R. L. Jullien, A. T. Dossey, J. A. Morales-Ramos and M. G. Rojas, “Chapter 6 - Insect Mass Production Technologies,“ in *Insects as Sustainable Food Ingredients*, San Diego, Academic Press, 2016, pp. 153-201.
- [26] M. Bawa, S. Songsermpong, C. Kaewtapee and W. Chanput, “Effects of microwave and hot air oven drying on the nutritional, microbiological load, and color parameters of the house crickets

- (*Acheta domestica*),” *Journal of Food Processing and Preservation*, no. 5, pp. 3-12, 23 únor 2020.
- [27] Bepex International LLC, “Air Classifying Mill | Pulvocron,” Bepex International LLC, 2020. [Online]. Available: <https://www.bepex.com/products/pulvocron/>. [Accessed 2 Duben 2022].
- [28] S. Songsermpong, M. Bawa, C. Kaewtapee and W. Chanput, “Nutritional, sensory, and texture quality of bread and cookie enriched with house cricket (*Acheta domestica*) powder,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 44, no. 8, pp. 2-3, 2020.
- [29] E. Kamau, C. Mutungi, J. Kinyuru, S. Imathiu, C. Tanga, H. Affognon, S. Ekesi, D. Nakimbugwe and K. K. M. Fiaboe, “Moisture adsorption properties and shelf-life estimation of dried and pulverised edible house cricket *Acheta domestica* (L.) and black soldier fly larvae *Hermetia illucens* (L.),” *Food Research International*, vol. 1, no. 106, pp. 420-427, 2018.
- [30] M. H. Sipponen, O. E. Mäkinen, K. Rommi, R.-L. Heiniö, U. Holopainen-Mantila, S. Hokkanen, T. K. Hakala and E. Nordlund, “Biochemical and sensory characteristics of the cricket and mealworm fractions from supercritical carbon dioxide extraction and air classification,” *European Food Research and Technology*, vol. 1, no. 244, pp. 19-29, 2018.
- [31] G. Melgar-Lalanne, A.-J. Hernández-Álvarez and A. Salinas-Castro, “Edible Insects Processing: Traditional and Innovative Technologies,” *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 18, no. 4, pp. 1166-1191, 2019.
- [32] F. Rieger, V. Novák a T. Jirout, *Hydromechanické procesy 2*, Praha: ČVUT v Praze Fakulta strojní, 2005.
- [33] V. scientific, „RETSCH - Mlýny, Čelistové drtiče, Analytické síťovací stroje,“ VERDER scientific, 2018. [Online]. Available: <https://www.retsche.cz/cz/produkty/mleti/vyber-produktu-pro-mleti/>. [Přístup získán 4 Říjen 2021].
- [34] R. Chhabra and M. G. Basavaraj, “Chapter 5 - Particle Size Reduction and Enlargement,” in *Coulson and Richardson's Chemical Engineering (Sixth Edition)*, Butterworth-Heinemann, 2019, pp. 205-280.
- [35] I. Tole, K. Habermehl-Cwirzen and A. Cwirzen, “Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders – review,” in *Mineralogy and Petrology*, Springer Vienna, 2019, pp. 449-462.
- [36] D. Michaud, “911Metallurgist,” 911 Metallurgy Corp., 1 Lede 2012. [Online]. Available: <https://www.911metallurgist.com/equipment/hammer-mill-grinder/>. [Accessed 16 Říjen 2021].
- [37] U. A. e. Hashmi, “PARTICLE-SIZE ANALYSIS Particle-Size Distribution,” 1 Zář 2008. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/8421685/PARTICLE\\_SIZE\\_ANALYSIS\\_Particle\\_Size\\_Distribution](https://www.academia.edu/8421685/PARTICLE_SIZE_ANALYSIS_Particle_Size_Distribution). [Accessed 16 Říjen 2021].
- [38] Small Exotic Farm, “Small Exotic Farm,” Small Exotic Farm, 2019. [Online]. Available: <https://smallexoticfarm.ie/product/house-brown-cricket/>. [Accessed 11 Duben 2022].



- [39] D. T. Booth and K. Kiddell, "Temperature and the energetics of development in the house cricket (*Acheta domestica*)," *Journal of Insect Physiology*, vol. 53, no. 9, pp. 950-953, 2007.
- [40] SENS Food, "EatSENS," SENS, 2020. [Online]. Available: <https://eatsens.com/collections/cooking-baking/products/cricket-protein-cooking-powder?variant=32842155262089>. [Accessed 18 Březen 2022].
- [41] J. Hemerka, *Odlučování tuhých částic*, Praha: ČVUT, 1994.
- [42] Retsch GmbH., „Retsch : Střížné mlýny : SM 300 : Funkce a charakteristiky,“ Retsch GmbH., 2022. [Online]. Available: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/strizne-mlyny/sm-300/funkce-a-charakteristiky/>. [Přístup získán 20 Březen 2022].