

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Strojní

Ústav technologie, obrábění, projektování a metrologie

**Návrh technologie pro zpracování jílových
materiálů s prvky Průmyslu 4.0**

**Design of clay materials processing technology
with Industry 4.0 elements**

Diplomová práce



Autor: Štěpán Přibyl
Studijní program: Průmysl 4.0
Vedoucí práce: Ing. Jiří Kyncl, Ph.D.

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Příbyl** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **475002**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Průmysl 4.0**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh technologie pro zpracování jílových materiálů s prvky Průmyslu 4.0

Název diplomové práce anglicky:

Design of clay materials processing technology with Industry 4.0 elements

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše problematiky zpracování jílových hmot
- 2) Rešerše problematiky sběru a vyhodnocení dat ze zpracovatelských technologií
- 3) Analýza současného stavu ve vybraném výrobním podniku
- 4) Návrh technologie pro zpracování jílových materiálů
- 5) Technicko-ekonomické zhodnocení návrhu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Kyncl, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **20.10.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **28.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jiří Kyncl, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jiřího Kyncla, Ph.D., a k jejímu řešení použil pouze podklady uvedené v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl bych poděkovat panu Ing. Jiřímí Kynclovi, Ph.D. za jeho cenné a praktické konzultace, rady a za vstřícnost, kterou mi při tvorbě této práce projevil.

Dále bych chtěl poděkovat firmě P-D Refractories CZ a.s. za poskytnutí příležitosti podílet se na řešení tohoto projektu. Zejména děkuji panu řediteli Ing. Miroslavu Kotoučkovi za důležité podklady a konzultace a Ing. Dušanu Pospíšilovi za trpělivost a vstřícnost při analýze současného výrobního procesu.

Anotace

Název diplomové práce:	Návrh technologie pro zpracování jílových materiálů s prvky Průmyslu 4.0
Autor práce:	Štěpán Příbyl
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Kyncl, Ph.D.
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Rozsah práce:	134 stran
Klíčová slova:	Zpracování jílu, měření vlhkosti, drtiče, trhače, homogenizace, průmyslové senzory, Průmysl 4.0

Tato diplomová práce se zabývá zpracováním jílových materiálů a technologickým návrhem přípravy jílové směsi s prvky Průmyslu 4.0 pro firmu P-D Refractories CZ a.s. Teoretická část popisuje dostupné technologie a metody zpracování jílových materiálů a měření výrobních a materiálových parametrů. Zároveň se zabývá principy Průmyslu 4.0 jako možností propojení datových a technologických celků pro dosažení efektivní výroby. Praktická část se věnuje analýze současného stavu výrobního procesu jílové směsi ve firmě P-D Refractories CZ a.s., identifikaci kritických parametrů výroby a návrhu optimálních opatření. Výsledkem práce je návrh technologického řešení přípravy jílové směsi pro výrobu pálených komínových tvarovek a návrh systému sběru a zpracování dat. Vybrané komponenty návrhu byly navrženy v několika variantách a výběr vhodné varianty byl proveden pomocí multikriteriální analýzy na základě preferenčních vah.

Annotation

Title of the final thesis:	Design of clay materials processing technology with Industry 4.0 elements
Author:	Štěpán Příbyl
Supervisor:	Ing. Jiří Kyncl, Ph.D.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Head of department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Extent:	134 pages
Keywords:	Clay processing, moisture measurement, crushers, comminution, homogenization, industrial sensors, Industry 4.0

This master thesis deals with the processing of clay materials and the technological design of a clay mixture preparation plant with Industry 4.0 elements for P-D Refractories CZ a.s. The theoretical part describes available technologies and methods of clay materials processing and measurement of production and material parameters. Concurrently, it deals with the principles of Industry 4.0 as a possibility of interconnecting data and technological units to achieve efficient production. The practical part is devoted to the analysis of the current state of the clay mixture production process in P-D Refractories CZ a.s., identification of critical production parameters and design of possible optimal solutions. The result of the thesis is the design of the technological solution of the clay mixture preparation plant for the production of fired refractory pipes and the design of the data collection and processing system. The selected components of the design were proposed in several variants and the selection of the suitable variant was carried out using multicriteria analysis based on preference weights.

Obsah

Úvod.....	10
1 Problematika jílových materiálů	11
1.1 Jíl.....	11
1.2 Vlastnosti a parametry jílu	14
2 Technologie a metodika úpravy jílu	24
2.1 Metody úpravy.....	24
2.2 Těžba	25
2.3 Rozdružování	25
2.4 Třídění.....	26
2.5 Stárnutí (odležování).....	29
2.6 Technologie manipulace	29
2.7 Mechanické zdrobňování	30
2.8 Mísení	46
2.9 Sušení	48
3 Metody a technika měření při zpracování jílu.....	50
3.1 Měření vlhkosti.....	51
3.2 Analýza složení	62
3.3 Měření hmotnosti a hmotnostního toku	63
3.4 Měření hustoty	64
3.5 Měření žárovzdornosti.....	66
3.6 Měření plasticity	66
3.7 Měření granulometrie a velikosti zrna.....	68
3.8 Detekce poruch elektrických pohonů.....	71
4 Systémové řízení a automatizace	74
4.1 Průmysl 4.0.....	74
4.2 Systémová integrace	79
4.3 Prognostické a diagnostické modely	80
4.4 Údržba.....	82

5	Představení společnosti P-D Refractories CZ a.s.	85
6	Analýza současného stavu	86
6.1	Produkt	86
6.2	Materiál.....	87
6.3	Technologie a proces zpracování.....	91
6.4	Analýza z pohledu Průmyslu 4.0	97
6.5	Požadavky výrobního procesu.....	99
7	Vlastní návrh.....	100
7.1	Okrajové podmínky návrhu:.....	100
7.2	Rozhodovací metoda.....	100
7.3	Dekompozice a seřazení komponent	102
7.4	Technologie úpravy jílu	103
7.5	Monitoring pro údržbu	111
7.6	Data a systémy.....	113
7.7	Shrnutí návrhu.....	119
8	Technicko-ekonomické hodnocení	122
9	Závěr	126
	Seznam použité literatury.....	128
	Seznam tabulek	131
	Seznam obrázků	132

Zkratky a symbolů

ML – machine learning (strojové učení)

D_V objemový moment částic

D_{80} statistický průměr velikosti částic

R_{80} statistický redukční poměr

W_P relativní vlhkost částic

W_a absolutní vlhkost částic

ρ_S hustota kompaktního materiálu

ρ_V objemová hustota

P_a pórovitost výpalku

\dot{m}_{teor} hmotnostní tok válcovým drtičem

NMR nukleární magnetická resonance

IR infračervené spektrum

TDR refraktometrie v časové doméně

Úvod

Tématem této diplomové práce je proces zpracování jílové suroviny pro výrobu komínových tvarovek. Výrobní linka produkuje směs jílu s ostřivem, která je v navazujícím procesu je zpracována na extrudéru. Pro proces lisování jsou velmi důležité vstupní materiálové parametry směsi, např. vlhkosti, které následně ovlivňují kvalitu a jakost finálního výrobku. Cílem práce je navrhnout takové řešení výrobní linky, která by zajistilo stabilitu vstupních parametrů namíchané směsi a tím následně vysokou kvalitu komínových tvarovek a optimální technickou využitelnost zařízení. Navrhované inovace jsou průběžně konzultovány s odborníky z firmy P-D Refractories CZ a.s., našeho předního výrobce žárovzdorného zboží z dinasu, jílu apod.

Část 1 diplomové práce bude věnována jílu jako materiálu, budou prostudovány jeho veškeré parametry a důležité vlastnosti pro vlastní návrh technologie, např. vlhkost, granulometrie, chemické složení, mineralogie apod. V části 2 bude rozebrána technologie zpracování jílu v průmyslových podnicích. Důraz bude kladen na popis technologie zdobňování, které je zahrnuto ve výrobní lince. Část 3 bude zaměřena na metodiku měření vlastností jílu v průběhu výrobního procesu. Důležitými měřenými parametry jílu jsou vlhkost a granulometrie, které ovlivňují přetvárnou energii jílu. Tato část zároveň zahrne metodiku monitorování stavu výrobní technologie. V navazující části 4 budou popsány technologie a principy Průmyslu 4.0 a navazujících disciplín. Tato kapitola bude obsahovat nástroje nutné k systémovému propojení výroby s naměřenými daty. Pro modelování stavu materiálu a technologií také budou zkoumány prognostické datové modely.

V kapitole 5 bude představena firma P-D Refractories CZ a.s., která poskytla příležitost se podílet na projektu optimalizace výrobní linky pro zpracování jílové suroviny. Následující kapitolou bude analýza současného výrobního procesu ve firmě a vyvození parametrů, které vlastní řešení práce musí splnit.

Navrhované řešení má optimalizovat výrobní systém na základě požadavků plynoucích z analýzy současného stavu výroby. Návrhem optimalizace technologie zpracování jílové suroviny a systému pro sběr a zpracování dat, které dohromady umožní nastavit a udržet stabilní proces výroby, budou cíle práce splněny. Navrhované řešení bude vyhodnoceno a konzultováno po technické stránce z hlediska realizovatelnosti a investice do zařízení i po ekonomické stránce za účelem určení doby návratnosti.

1 Problematika jílových materiálů

Jílové materiály jsou ústředním tématem této práce. V této kapitole je blíže rozvedeno, jak jsou jílové materiály definovány, jak a z čeho vznikly, jak se dělí a také vybrané vlastnosti, které hrají klíčové role při výběru konkrétních zdrojů

1.1 Jíl

Jíl je přírodní jemně zrnitý neupravený soudržný sediment, který obsahuje převážně jílové minerály. Druhotnými složkami jílu jsou zrna křemene, žuly, zirkonu, apatitu a dalších minerálů, hydroxidy železa, organické složky apod. Dle hrubosti složek se za jíl považují zeminy, které obsahují více než 50 % jíloviny, což je zemina se zrnitostí menší než 2 μm , viz Tabulka 1.1. Vzniká různými přirozenými mechanismy, převážně usazováním zplodin přirozeného rozpadu hornin.



Obrázek 1.1: Jílový lom

1.1.1 Jílové minerály

Jílové minerály jsou velikou nehomogenní skupinou minerálů. Běžně se vyskytují v usazených nebo přeměněných horninách. Představují velice důležitou složku půdy a zásadní složku jílových zemin. Utváří částice menší než 4 μm . Vyznačují se vysokým obsahem SiO_2 a Al_2O_3 a dalších chemických prvků jako draslík, sodík, vápník, hořčík, železo nebo voda v podobě hydroxylové skupiny nebo přímo vázaná v krystalové mřížce, např. hydratovaný křemičitan hlinitý. (Starý et al. 2021)

Jílové minerály vznikají jako produkt zvětrávání nebo minerální alterace např. živců nebo dalších křemičitanů. Zvětrávání hornin probíhá různými mechanismy, které se dělí do dvou základních skupin – mechanické a chemické.

Mechanické zvětrávání redukuje balvany zejména vyvěřelých a přeměněných hornin na menší fragmenty. Mezi principy mechanického zvětrávání patří roztažnost vody v pórech při zamrznutí, uvolnění napětí hornin při zvětrání okolních zatěžujících

materiálů nebo jejich kombinace. Výsledkem zvětrání jsou balvany, štěrky, písky, kaly a jíly, které zůstanou nebo jsou dále vodou či větry transportovány do jiných oblastí.

Chemické zvětrávání se odehrává převážně v přítomnosti vody a probíhá zároveň s mechanickým zvětráváním, díky čemuž se otevírá větší plocha pro vodní kontakt. Látky rozpuštěné ve vodě potom reagují s látkami v horninách a způsobují jejich degradaci. Mezi principy chemického zvětrávání patří loužení, přímá reakce s horninami za vzniku hydrátů nebo reakce rozpuštěné kyseliny uhličitě za vzniku uhličitánů a dalších minerálů, jako např. jíly. (Tiab a Donaldson 2012)

Jílové minerály se dělí do několika skupin. Nejvýznamnější skupiny, do kterých spadá kolem 30 různých druhů čistých jíků, jsou následující:

- *Kaolinit* ($\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$)
- *Montmorillonit* (komplexní hydratované křemičitany Al, Mg a Na) – nejznámější zástupce této skupiny je bentonit
- *Illit* (komplexní hydratované křemičitany Al, Mg, Fe, Na)
- *Halozity* ($\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \times 4\text{H}_2\text{O}$)

1.1.2 Využití jílu v průmyslu

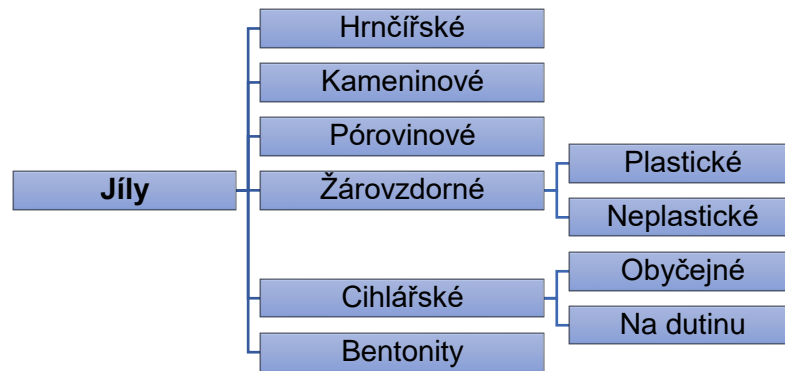
Jílové materiály jsou velice široce využívány. Tradičně se používají v keramickém průmyslu pro výrobu nádobí (porcelánové, keramické či kameninové). V konstrukční keramice pro výrobu cihel, kachliček apod. Ostatní procesy, kde jíh hraje důležitou roli, jsou výroba papíru, cementu nebo filtrace v potravinářství. Bentonitové jíly mají různá užití v závislosti na mineralogickém složení. Používají se jako pojivo ve slévárenství, v metalurgii pro výrobu železných pelet, jako adsorbent, plnivo apod. Mezi moderní odvětví využití jílu se řadí zdravotnictví, výroba polymerních nanokompozitů nebo jako odlučovač různých částic včetně radionuklidů z radioaktivního odpadu. Speciálním keramickým produktem jsou žárovzdorné cihly a ostatní produkty vyráběné ze žárovzdorných jíků. Žárovzdorné zboží může odolat teplotám až 1780 °C. (Starý et al. 2021)

1.1.3 Klasifikace jíků

Jílové materiály lze dělit dle řady hledisek.

1.1.3.1 Klasifikace jíků dle technologických vlastností

Pro využití jílu při výrobě cihel, žárovzdorných vložek a dalších cihlářských produktů souvisejících s tématem práce je podstatná klasifikace jílových materiálů dle technologických vlastností.



Obrázek 1.2: Klasifikace jílu dle technologických vlastností

a) *Cihlářské jíly*

Cihlářské suroviny jsou „veškeré zplodiny přírodního rozkladu hornin, které jsou použitelné pro cihlářskou výrobu buď přímo, tj. v přírodním stavu, nebo po potřebné úpravě.“¹ Obyčejné cihlářské jíly jsou využitelné pro plné cihly. Jíly na dutinu jsou jemnější a používají se na různé jílové profily.

b) *Kameninové a dlaždicové*

Široká škála technologických vlastností a využití, např. v kamenictví, keramice, pro výrobu obkladů, aditiv apod. Jedná se o jíly s hutnou konzistencí.

c) *Plastické žárovzdorné*

Pro svoji plasticitu využívány jako tmelící složka do keramických a žárovzdorných materiálů. Vyznačují se vysokým obsahem Al_2O_3 . Hlavním jílovým minerálem plastických žárovzdorných jílu je kaolinit a různě se liší zastoupení ostatních minerálů jako ilit, muskovit, křemen a další.

d) *Žárovzdorné neplastické*

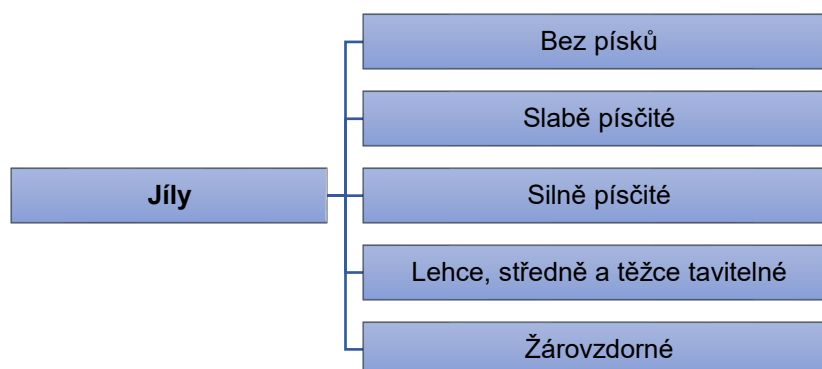
Používány pro výpal ostřiv do žárovzdorných materiálů. Charakteristikou složení je vysoký obsah Al_2O_3 a kaolinitu a co nejnížší obsah Fe_2O_3 a organických příměsí. Požadavky na tento druh jílu jsou vysoká žárovzdornost, oteřuvzdornost, teplotní deformace a co nejnížší absorpční kapacita po vypálení. Stejně jako u plastických, stěžejním jílovým minerálem je kaolinit (Starý et al. 2021). Žárovzdorné jíly jsou často kontaminovány množstvím nežádoucích oxidů, jako TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO nebo alkalické oxidy, které fungují při vyšších teplotách jako tavidlo. Eutektická teplota směsi je těmito oxidy snižována, proto se jejich koncentrace udržuje na možném minimu. (Andrews et al. 2013)

¹ (Řepka 1998) str. 60

e) Bentonity

Vyznačují se vysokým obsahem smektitů, zejména montmorillonitu a beidellitu. Typickou vlastností je vysoká absorpční kapacita a charakteristické mechanické vlastnosti směsi jílu s vodou. (Starý et al. 2021)

1.1.3.2 Klasifikace podle obsahu ostřiv a taviv



Obrázek 1.3: Klasifikace jílu obsahu ostřiv a taviv

1.1.4 Sekundární jíly

Vedle jílu těžených k přímému zpracování existují také sekundární jíly. Ty vznikají jako vedlejší produkt např. při výrobě kaolinu, zpracování skla, ve slévárenství nebo jako prach při výrobě z kalcinovaného jílu. Vedle odpadních produktů se za sekundární jíly také považují těžce využitelné jíly s nevhodnými vlastnostmi, např. surové kaoliny s příliš vysokou plasticitou, vysokým podílem Fe_2O_3 , vysokou absorpční schopností, organickými nečistotami apod. (Starý et al. 2021). Hamza et al. (2019) rozvádí též využití červených zemin a kalu s vysokým obsahem alkalických solí jako problematiku využití sekundárního materiálu.

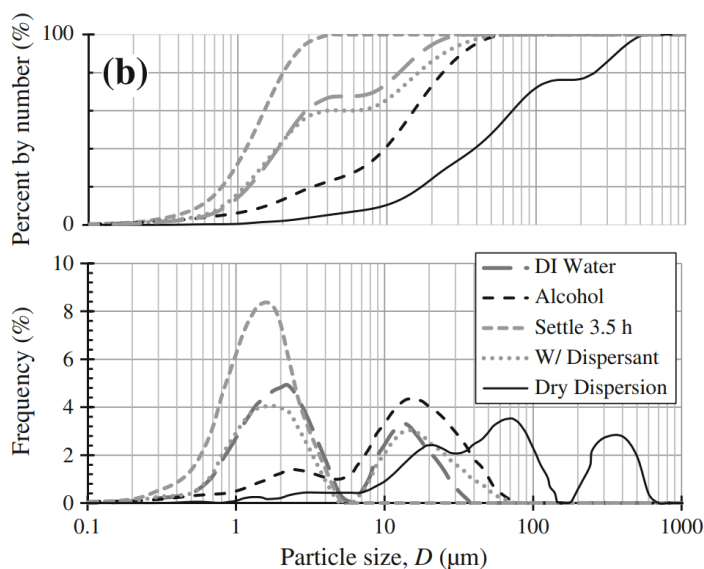
1.2 Vlastnosti a parametry jílu

Při návrhu výrobního procesu vznikají nároky na materiál definované sadou charakteristických parametrů. Typické parametry popisující kvality jílových materiálů jsou shrnuty v této kapitole. Charakteristiky jednotlivých materiálů se získávají pomocí materiálových zkoušek, které jsou zakotveny v normách nebo jsou součástí firemního know-how.

1.2.1 Zrnitost (granulometrické složení)

Dle ČSN 72 1565-2 je zrnitost (nebo také granulometrické složení) cihlářských zemin charakteristická vlastnost dané zeminy, vyjádřená kvantitativním podílem přítomných zrn podle jejich velikosti. Graficky lze granulometrickou skladbu vyjádřit

pomocí zrnitostní křivky, viz Graf 1.1. Tato křivka vyjadřuje poměrné hmotnostní zastoupení jednotlivých frakcí na daném rozsahu.



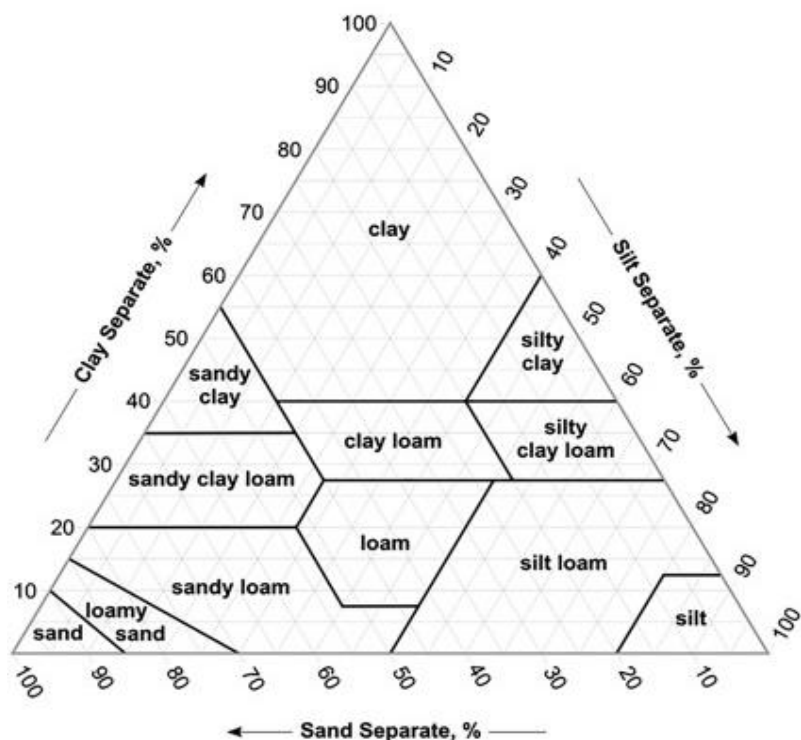
Graf 1.1: Zrnitostní křivky vzorků dispergovaného Na-montmorillonitu (Tan et al. 2014)

Zeminy lze dle granulometrické skladby rozdělit do několika kategorií, viz Tabulka 1.1 a jejich charakter lze určit na základě trojúhelníkového diagramu zrnitosti, viz Obrázek 1.4. Zastoupení jednotlivých frakcí má zásadní vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu. Jílové minerály utváří částice o velikosti menší než 4 μm a jedná se o kategorii zemin s nejjemnější zrnitostí. Z technologického hlediska platí „obecně – čím jemnější hlíny, tím jsou použitelnější.“²

Tabulka 1.1: Druhy zemin dle zrnitosti (Řepka 1998)

Velikost částic	Kategorie
Více než 2,00 mm	Velmi hrubá pískovina
0,20 až 2,00 mm	Hrubá pískovina
0,02 až 0,20 mm	Jemná pískovina
2 μm – 20 μm	Sprašovina
Méně než 2 μm	Jílovina

² (Řepka 1998, s. 7)



Obrázek 1.4: Trojúhelníkový diagram pro zařazení zemin dle zrnitosti (Mobilian a Craft 2022)

Zeminy jsou obecně tvořeny úlomky hornin a zrna jednotlivých minerálů. Nemají pevné strukturní vazby, jsou tak nezpevněné, případně slabě zpevněné. Zrnitost zemin se určuje mechanickým rozborem. Pro zeminu s obsahem hrubších částic (písky, štěrky) se používají prosévací metody a v případě jemnějších zemin se používá hustoměrná (sedimentační) metoda. Jemné částice tvoří soudržné struktury, které jsou při analýze dispergovány vhodnou metodou (za sucha či za mokra). Jednotlivé metody analýzy zrnitosti jsou popsány v kapitole 3.7.

1.2.2 Velikost zrna

Jedním z materiálových parametrů pro dimenzování technologie drcení a trhání zemin je *velikost zrna* (často také označována jako zrnitost). Na rozdíl od zrnitosti, velikost zrna informuje o momentálním stavu rozmělnění materiálu. Po vytěžení tvoří soudržný jílový materiál zrna o velikosti v řádech jednotek až stovek milimetrů a v následných fázích procesu je velikost zrna postupně redukována. Geometrie drticích válců nebo mlýnů pro zpracování tohoto materiálu musí odpovídat jeho momentální velikosti zrna. Existuje několik metrik popisu velikosti zrna.

- a) Středí průměr zrna

Základní metrikou pro charakteristiku velikosti kusů je *střední průměr zrna*, který se počítá jako aritmetický průměr dvou největší rozměrů (např. při pozorování mikroskopem) nebo všech tří rozměrů (při možnosti změřit všechny tři).

b) Model ekvivalentních koulí

Velikost částic byla poté určena pomocí modelu ekvivalentních koulí vycházejícím z objemového momentu částic daného rozsahu velikosti dle rovnice (1.1), kde \bar{D}_V je střední průměr všech pozorovaných částic a aglomerátů (též „vloček“), n je počet částic o dané velikosti a l je průměr částice.

$$\bar{D}_V = \frac{\sum(n \times l^4)}{\sum(n \times l^3)} \quad (1.1)$$

c) Sítový rozbor

Pro určení velikosti zrna materiálu se používá např. průměr otvoru kruhového síta, kterým projde 80 % hmotnosti, značený D_{80} . Sítový rozbor se používá především k určení zrnitosti (granulometrického složení), které je blíže popsáno v kapitole 3.7.

1.2.3 Složení a aditiva

Fyzikální vlastnosti materiálů, jako např. hustota, rychlost šíření zvuku, stlačitelnost a smáčivost jsou důsledkem minerálního nebo chemického složení hornin. Základními materiály, z nichž se horniny skládají, a jejich chemické vlastnosti a procesy jsou spojeny s petrofyzikálními vlastnostmi hornin (Tiab a Donaldson 2012).

V přírodě jílové zeminy obsahují množství složek různého charakteru, např. tvrdé úlomky nerostů a hornin (písky, slída, křemen, karbonáty, ložiska kovů...), cicváry (vápnité konkrce), organické nečistoty apod. Pro dosažení požadovaných vlastností se tyto přirozené příměsi z materiálu vyřazují, a naopak jsou přidávána různá aditiva. (Starý et al. 2021) (Řepka 1998)

a) Lehčiva

Jako lehčiva mohou být využity popílký, které plní též funkci ostřiva. Lehčiva odlehčují konečný produkt. Při vnesení do směsi se vytvoří malé sklovité kuličky o nízké objemové hmotnosti. Při vypalování cihel zbytky popílků a organických přísad vyhoří a zbydou po nich drobné dutinky.

b) Ostřiva

Ostřivo je neplastická přísada jílových materiálů, která snižuje plasticitu materiálu. Jako ostřivo se používá písek, popel, piliny, stěpiny apod. Ostřivo by mělo být dostatečně jemné a nemělo by obsahovat slídu, jílovité příměsi, velice škodlivé

siderity a pelosiderity apod. Křemičitý písek se dobře uplatňuje při výpalu díky vhodné tepelné roztažnosti. Ze stejného důvodu zlepšuje též žárovzdornost materiálu.

c) Nežádoucí příměsi

Nežádoucími složkami žárovzdorných jílu jsou vybrané oxidy (Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , CaO), které fungují jako tavidla a zhoršují vlastnosti materiálu při výpalu. (Andrews et al. 2013)

1.2.4 Vlhkost jílu

Dle ČSN 72 1565-1 vlhkostí jílu rozumíme množství vody obsažené ve vzorku zeminy odstranitelné vysoušením při teplotě $110\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Vytěžené suroviny obecně obsahují přirozenou míru vlhkosti, tzv. přírodní vlhkost. U tvrdých hornin se jedná zhruba o 1 %, u jílových zemin zhruba o 10 %. Vlhkost suroviny se mění sezonně v závislosti na počasí. Jedná se o tzv. sezonní vlhkost. Vlhkost je v materiálu vázána několika způsoby:

- a) Voda krystalická v krystalické mřížce
- b) Voda vázaná na površích aktivně orientovaných molekul
- c) Voda vázaná kapilárními silami v jemných pórech a na povrchu částic
- d) Voda vyplňující mezery mezi zrny materiálu
- e) Voda chemicky vázaná

Každá forma vlhkosti má jiný stupeň kinetické energie molekul a také energii vazby, kterou je nutno vynaložit pro oddělení molekul vody.

Během výrobních procesů bývá potřeba vlhkost snižovat. Sušením je možné odstranit pouze vodu, která není chemicky nebo krystalicky vázaná, tedy pouze případy b, c, d. Volné molekuly vody vyplňující mezery mezi zrny materiálu jsou dostatečně daleko od jeho molekul, tedy nevznikají mezi nimi žádné vazby. Ve vodě vázané na površích molekul a v pórech jsou molekuly adsorbovány – tedy jsou zbaveny určitých molekulárních stupňů volnosti (Wang 2000). Tyto oddělitelné formy vlhkosti se dělí:

- a) Hygroskopické – pomalejší odpařování, vázaná vaznými silami (koloidní, kapilární, ...),
- b) Volné – odpařování probíhá stejně jako z vodní hladiny (Řepka 1998)

1.2.4.1 Relativní a absolutní vlhkost

Vlhkost se dá rozdělit podle ČSN 72 1565-1 na absolutní a relativní. Relativní vlhkost se značí W_p a je vyjádřena v procentech původní hmotnosti vlhkého vzorku. Její výpočet je popsán rovnicí (1.2). Absolutní vlhkost se značí W_a , a na rozdíl od relativní

vlhkosti udává procentuální vlhkost vůči suchému vzorku. Její výpočet je zapsán rovnicí (1.3).

$$W_p = \frac{m_v - m_s}{m_v} \cdot 100 (\%) \quad (1.2)$$

$$W_a = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 (\%) \quad (1.3)$$

Pro vzájemná vztah rovnic platí:

$$W_p = \frac{W_a}{100 + W_a} \quad W_a = \frac{W_p}{100 - W_p} \quad (1.4) \quad (1.5)$$

kde m_s je hmotnost vysušeného materiálu a m_v hmotnost vlhkého.

1.2.4.2 Technologické dopady vlhkosti

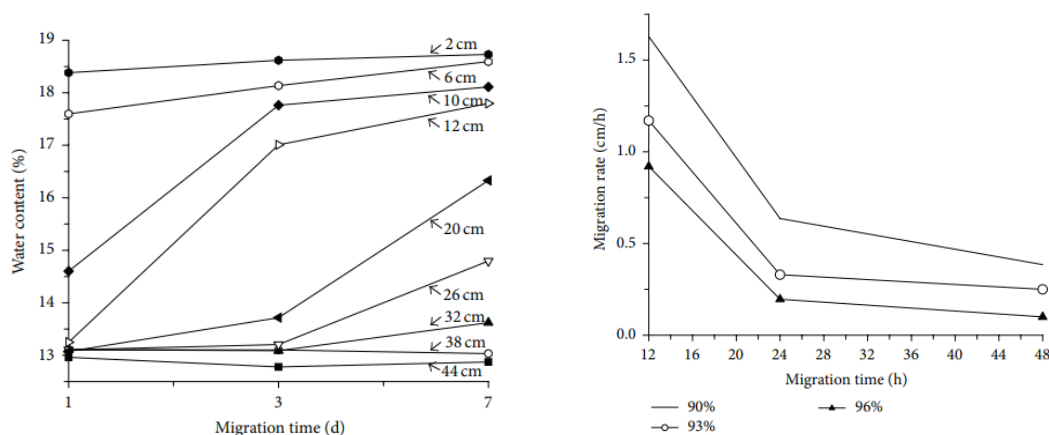
Vlhkost jílu zásadně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti, zejména plasticitu, pevnost v tlaku, tahu nebo ohybu a se zvyšující se vlhkostí roste jeho objem i hmotnost. Změna vlhkosti hraje velkou roli při zpracování jílových směsí. Vlhkost zejména plastických zemin způsobí horší rozpojovatelnost. Některé sekundární drtiče proto operují s určitým limitem vlhkosti. Z toho důvodu se před sekundární drcení v nutných případech zařazuje vysoušení materiálu. (Řepka 1998)

Nedostatečně homogenní vlhkost materiálu utváří lokálně objemy s rozdílnou plasticitou. Právě konstantní plasticita je velice důležitá pro regulaci výkonu extrudéru a kvality konečného produktu.

Změny vlhkosti jílu se mimo výrobu projevují také v různých odvětvích stavitelství a geologie, např. ve stabilitě podkladu. Změna pevnosti a eroze v důsledku zvýšené vlhkosti prostředí (spodní vody nebo období dešťů) mohou způsobovat destabilizaci a sesuvy půdy. Zhang et al. (2015) popisuje problémy při využití jílové směsi jako konstrukčního materiálu při stavbě dálnic v Číně. Zde dochází k pevnostním změnám při absorpci vlhkosti z okolí.

1.2.4.3 Homogenizace vlhkosti

Voda obsažená v jílových materiálech postupně prostupuje skrz objem materiálu. Dle normy ČSN 72 1565-9 lze testovat tuto vlastnost materiálu jako odleživost, která je popsána v kapitole 1.2.5 i). Prostupem vlhkosti surovinou se zabýval Zhang et al. (2015), který provedl měření migrace vlhkosti ve vzorcích jílové půdy pomocí rentgenové sondy. Výsledek experimentu vypovídá o omezené schopnosti jílu vést vlhkost a homogenizovat na větších objemech. Experiment také ukazuje, že záleží na stupni stlačení jílu.



Graf 1.2: Výsledek experimentu migrace vlhkosti ve stlačeném jílu při simulovaném dešti (Zhang et al. 2015)

1.2.5 Další parametry

a) Plasticita

Plasticita je schopnost materiálu deformovat se tlakem bez porušení a trhlin. Přirozeně se vyskytující jíly se v plasticitě přirozeně velmi liší. Tato různorodost je dána obsahem různých přídatných materiálů, které byly vneseny do jílu během procesu zvětrávání. Plasticita je vlastnost složená z *vaznosti*, *průtažnosti* a *tvárlivosti*.

- *Tvárlivost* je schopnost měnit tvar pomocí působení mechanické síly. Dle tvárlivosti dělíme hlíny na hubené (krátké) a mastné (tučné).
- *Průtažnost* je dle ČSN EN ISO 10318-1 bod napětí jiný než bod porušení, ve kterém dochází k další deformaci bez přírůstku napětí. Jedná se o vlastnost shodnou s mezí kluzu.
- *Vazností*, dle ČSN 72 1134, rozumíme schopnost látky přijímat ostřivo. Vyjadřuje se procentuálním přídatkem ostřiva, při němž pevnost v tahu za ohybu u vzniklé směsi klesne na 0,6 MPa.

Významnou roli hraje plasticita při zpracování materiálu. V případě výroby žárovzdorného zboží jsou materiály s nižší plasticitou nepoddajné a jejich extruze nebo drcení je energeticky náročnější. Naopak příliš plastické materiály vykazují horší vlastnosti při výpalu. Plasticitu lze ovlivnit prostřednictvím vhodného mísení. Plasticita je ovlivněna obsahem jílových minerálů, aditiv, obsahem vody a granulometrickým složením materiálu. Typickým aditivem pro regulaci plasticity je ostřivo – viz kapitola 1.2.3.

b) Pevnost

Obecně, pevnost je schopnost materiálu odolávat účinkům působících napětí. V problematice žárovzdorných jílu se měří pevnost hotového výrobku po výpalu pro určení kvality produktu, ale také suroviny před výpalem, zejména jako součást materiálových zkoušek (např. zkouška plasticity).

Pevnost v tahu – poměr tahové síly k průřezu zkušebního tělesa v okamžiku jeho destrukce – důležitá zejména pro materiál před výpalem, kdy pevnost v tahu vypovídá o plasticitě a dalších technologických parametrech suroviny.

Pevnost v ohybu – poměr ohybového momentu, vyvozeného zatěžovací silou při zlomení tělíska k průřezovému modulu v ohybu. Pevnost v ohybu vypovídá o lámavosti tělesa, tedy o kvalitě výsledného produktu, která je garantována výrobcem.

c) Hustota kompaktního materiálu

Hustota kompaktního materiálu je jednoznačná hodnota charakteristická pro daný materiál. Jedná se o hmotnost určitého objemu materiálu bez vzduchových mezer. V_s může být např. přírůstek objemu vody v odměrném válci po přidání odměřené hmotnosti materiálu m .

$$\rho_s = \frac{m}{V_s} \quad (1.6)$$

d) Objemová (sypná nebo zdánlivá) hustota

Objemová hustota je přímým měřítkem stlačení zrn sypkého materiálu v definovaném objemu. Jedná se o poměr hmotnosti ku objemu volně sypaného materiálu bez stlačování nebo setřásání. Její hodnota je závislá na aktuálních podmínkách a není jednoznačná na rozdíl od hustoty kompaktního materiálu. Význam objemové hustoty spočívá zejména v dimenzování skladovacích prostor, při volbě technologie dalšího zpracování nebo také indikaci kvality produktu.

$$\rho_v = \frac{m}{V_v} \quad (1.7)$$

e) Délkové změny sušením a pálením

Dle normy ČSN 72 1565-5 délkové změny sušením a pálením jsou změny lineárních rozměrů zkoušených tělísek způsobené sušením a výpalem. Změny se vyjadřují v procentech původních rozměrů. Norma rozlišuje délkovou změnu sušením (DS), pálením (DP) a celkovou (DC).

$$DS = \frac{l_s - l_z}{l_z} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$DP = \frac{l_p - l_s}{l_s} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$DC = \frac{l_p - l_z}{l_z} \cdot 100\% \quad (3)$$

l_s je daný délkový rozměr testovací cihly po vysušení, l_p je daný délkový rozměr testovací cihly po výpalu a l_z je délka břitu razničky. Změny délkových rozměrů jsou charakteristikou materiálu a vypovídají o chování materiálu během výpalu při výrobě cihlářských výrobků.

f) Zdánlivá pórovitost výpalku

Pórovitost je vlastnost pevné látky charakterizovaná obsahem pórů. Tento údaj má zásadní vliv na funkční prvky žárovzdorných produktů. Zdánlivá pórovitost je definována jako objem tekutiny absorbované póry, když je materiál vařen ve vakuu

$$P_A = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (1.8)$$

kde m_1 a m_2 jsou hmotnosti absolutně vysušeného a plně saturovaného vzorku a V je objem vzorku.

g) Žárovzdornost

Žárovzdornost je schopnost materiálů odolávat deformaci při vysokých teplotách. Jedná se o základní parametr žárovzdorného zboží. Tato vlastnost je stanovená porovnáním žároměrné shody s tzv. laboratorními žároměrkami. Tato metoda je popsána v kapitole 3.5.

h) Odleživost

Dle ČSN 72 1565-9 je odleživost schopnost plastického těsta v závislosti na čase měnit své vlastnosti vlivem dokonalejšího prostoupení vody těstem. Zmíněná norma specifikuje materiálový test spočívající v měření únosnosti v tahu během odležení. Optimální doba odleživosti je potom doba, za kterou bylo dosaženo maximální únosnosti v tahu nebo kdy únosnost již podstatněji nevzrůstá.

2 Technologie a metodika úpravy jílu

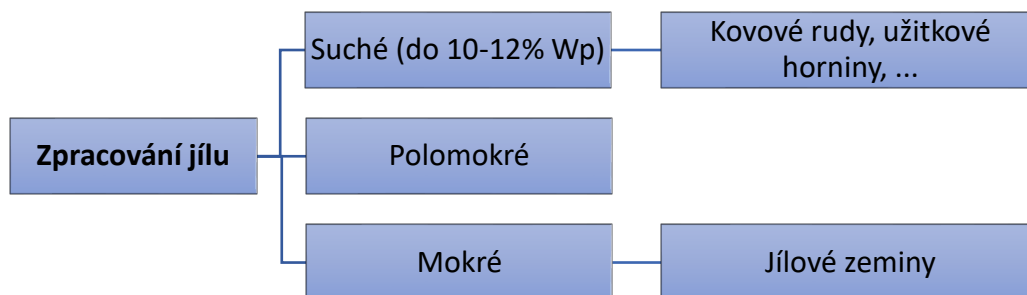
Cílem úpravy jílu je přizpůsobit hrubý vstupní materiál dle požadavku normy nebo navazující výroby. Hrubý materiál je typicky potřeba zjemnit, rozdružit užité složky od jalových nebo škodlivých příměsí a namíchat se složkami dle receptury pro dosažení žádané plasticity a dalších vlastností. K doplňujícím pochodům patří odvodňování a sušení produktů. Důležitým principem úpravy jílu je homogenizace neboli pochod zvyšující stejnorodost surovinových směsí. Té je dosahováno různými způsoby, např. zdrobňováním, mísením, mícháním, hnětením, difúzí apod.

Surovina pro výrobu cihlářských produktů je zpracována v 8 nebo 10 krocích v závislosti na užití suché či mokré metody. U suché metody jsou vynechány kroky iii a iv. (Řepka 1998)

- i. *Dobývka a odležení* – dochází k rozpadu hrudek, vyhnutí organických částí, oxidaci pyritu; jíl leží v umělých jamách přímo v místě vytěžení
- ii. *Zdrobňování, třídění, homogenizace*
- iii. *Plavení* – v případě výroby velice kvalitních surovin, rozdrůžování metodou rozdílných rychlostí sedimentace ve žlabech
- iv. *Vytuhování* – odvodnění, vysychání
- v. *Ostření* – přidavek neplastické suroviny, zpravidla 10–30%
- vi. *Mletí a hnětení* – mlýny a mísiče
- vii. *Tváření* – tvářecí lis s přídávkem vlhkosti; použití šnekových vakuových lisů s automatickým zavlhčením
- viii. *Sušení* – pomalý proces sušení vlhkých vytlačených cihel
- ix. *Pálení* – běžně v kontinuálních nebo periodických tunelových pecích
- x. *Paketování a balení* – balení pomocí smršťitelné folie a páskování s maximalizovanou mírou automatizace

2.1 Metody úpravy

Metody úpravy jílu se dle vlhkosti dělí na mokré, polomokré a suché. V regionu střední a severní Evropy je typická zejména polomokrá a mokrá metoda. Hranice vlhkosti mezi metodami si určují výrobci technologií. Např. firma Verdés S.A. má vrchní hranici suché metody nastavenou na 12% vlhkosti směsi, firma Lhoist zase uvádí rozmezí 10 až 12% vlhkosti.



Obrázek 2.1: Dělení způsobů zdrobňování

2.2 Těžba

Typickou těžební technikou jsou korečková a lopatová rypadla.

2.2.1.1 Korečková rypadla

Základním prvkem rypadla je koreček. Jedná se o menší lopatovou lžici. Korečky jsou umístěny v sérii na nekonečném páse a odebírají surovinu buď na výšku nebo do hloubky. Korečkový pás se odvaluje po šestibokém turasu a je napnut na výložníku.

Tyto stroje se používají nejen pro těžbu zemin a jiných lehce rozpojitelných surovin, ale také pro manipulaci materiálu při odležení a skladování. Díky svému principu promíchává jednotlivé vrstvy suroviny a tím přispívá k její stejnorodosti. (Pán a Jukl 1985)

2.2.1.2 Lopatová rypadla

Lopatová rypadla se pohybují na pásovém podvozku. Otočný svršek nese rameno s hloubkovou nebo výškovou lopatou poháněné hydromotory. Lopatová rypadla jsou oproti korečkovým rypadlům pohyblivější a méně náročná na úpravu terénu. Dají se použít pro těžbu i středně rozpojitelných a ulehlých surovin (pískovec, písčité štěrky) a při manipulaci s rozpojeným materiálem nakládat i velmi pevné materiály jako žula, čedič nebo vápenec. Těžba jílu probíhá ve dvou stupních na skloněné stěně (Pán a Jukl 1985)

2.3 Rozdružování

Rozdružování je úprava látkového složení surovin spočívající v oddělení jalové a škodlivé složky od složky užité. Jedná se o důležitý krok úpravy jílu, jehož cílem získávat neznečištěné produkty. Pokud je vytěžená surovina dostatečně čistá pro další využití, potom není rozdružování potřeba. (Šebor 1983)

2.3.1 Fyzikální způsoby

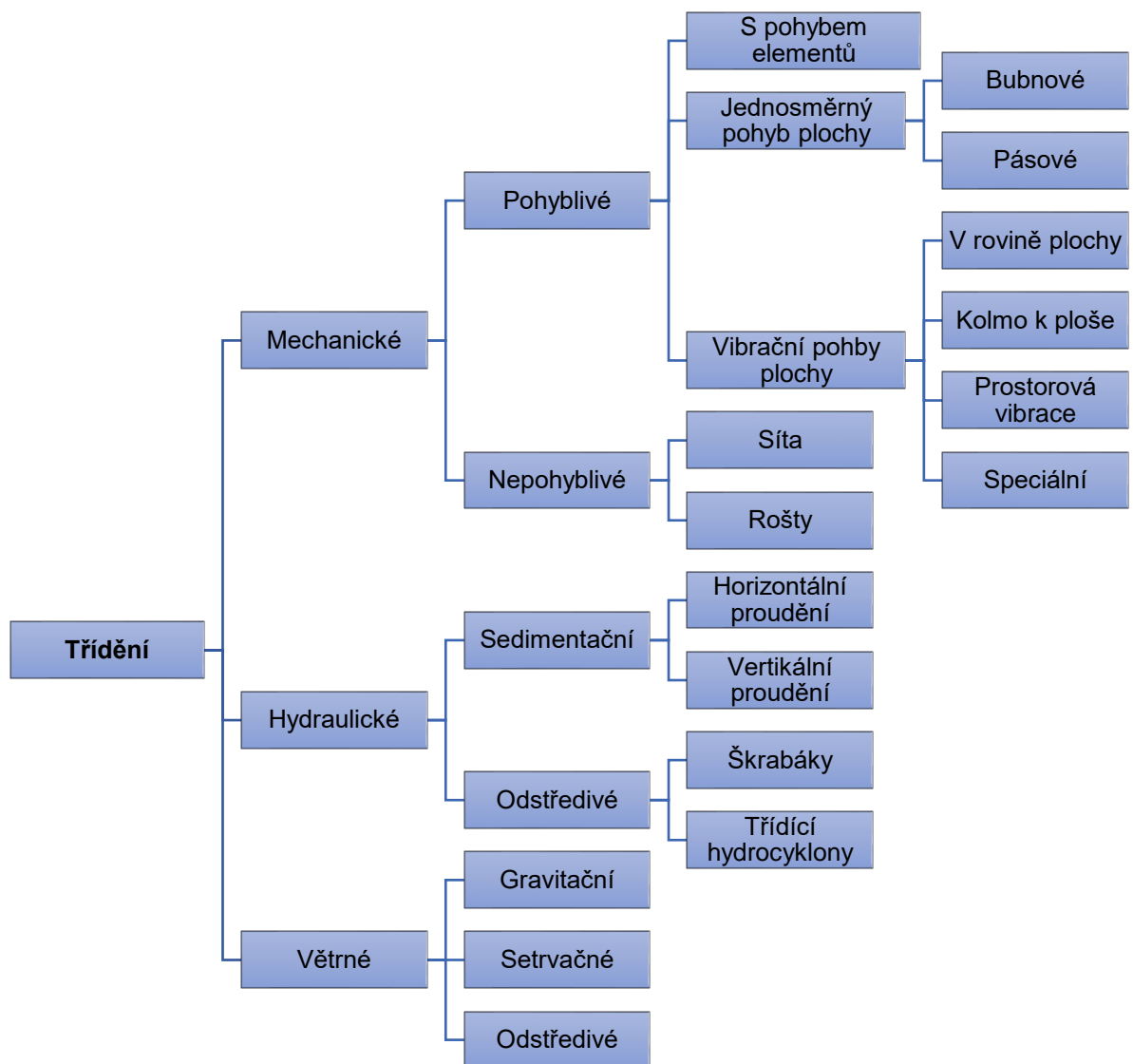
Založeny výhradně na rozdílných fyzikálních vlastnostech složek, jako měrná hmotnost, magnetické a elektrické vlastnosti, barva apod. Zásadním znakem fyzikálních způsobů rozdělování je neměnné chemické nebo petrografické složení materiálu.

2.3.2 Fyzikálně chemické rozdíly

Nejdůležitějším fyzikálně-chemickým způsobem rozdělování hornin je pěnová flotace. Flotace je pochod fyzikálně chemických dějů, které se odehrávají ve rmutu tvořeném vodou, minerály a vzdušnými bublinami.

2.4 Třídění

Třídění je proces třídění zrnitých materiálů na jednotlivé frakce podle velikosti zrn. Třídění je jedním z primárních procesů zpracování suroviny. Další z důležitých aplikací třídění je zefektivnění jemného mletí suroviny v uzavřeném okruhu, kde je třeba zabránit mletí již dostatečně rozemletých částic.



Obrázek 2.2: Roztřídění třídičů dle principu procesu (ČSN 72 9301)

2.4.1 Mechanické třídění

Při mechanickém třídění se materiál třídí dle velikosti zrna. Dle normy ČSN 72 9301 se metody mechanického třídění surovin v zásadě dělí na nepohyblivé a pohyblivé. Mezi konkrétní mechanické třídění obecně patří metody třídění na roštích, sítích nebo různých pohyblivých třídících plochách.

2.4.1.1 Nepohyblivé třídění (síta a rošty)

Nepohyblivými metodami třídění jsou síta a rošty bez pohyblivé plochy. Jednoduchá a levná technologie, která se obvykle využívá pro vytřídění velkých tvrdých kusů na počátku zpracování. Nicméně, jejich efektivita je velice nízká z důvodu častého zneprůchodnění.

2.4.1.2 Pohyblivé třídění

a) Vibrační

Mechanický vibrátor přeměňuje rotační pohyb motoru na pohyb přímočarý. Mají vysoký počet záchvěvů s malou amplitudou. Záchvěvy mohou mít různé směry (horizontální, vertikální, obecné). Generátory vibrací mohou být excentrické hřídele, které je pevně spojené s rámem síta, excentrické řemenice apod. Aby se vibrace ze stroje nepřenašely do podlaží, spočívají na pryžových podložkách nebo pružných závěsech.

V případě suchého třídění přináší vibrační síta vyšší efektivitu procesu třídění oproti statickým sítům. Příkladem stroje jsou vibrační kaskádovité rošty. Pro efektivní hrubé třídění suroviny se obvykle používá také nakloněné rotační síto. Pokud ale mezery síta klesnou na úroveň 40–50 mm, nebo se zvýší stupeň vlhkosti a hrubost suroviny, začne i jejich efektivita prudce klesat. (Yudin et al. 2020)

Vibrační síta se používají také při mokré metodě zpracování suroviny, např. k vytřídění jemných frakcí rozplavených kalů.

b) Třasadla (rotační síta)

Různě skloněná síta zavěšená na rámu jsou vychylována zalomeným hřídelem zakončeným setrvačnickem. Pohyb sít je krouživý. Připomíná pohyb vibračních sít s menší frekvencí. Třasadla se dají využít jako třídíče všech stupňů hrubosti suroviny.

c) Bubnové třídíče

Používá se pro hrubé třídění kamene často přímo v lomu. Stroj je tvořen soustavou navzájem spojených sít ve tvaru válce nebo šestihranu. Celá soustava je mírně nakloněna, otáčí se a melivo je přiváděno z vyšší strany. Síta jsou uspořádána buď za sebou nebo jsou vložena do sebe.

2.4.2 Hydraulické třídění (plavení)

Hydraulické třídění je založeno na rozdílných rychlostech sedimentace jednotlivých složek. Na rozdíl od třídění na roštech a sítích záleží nejen na velikosti, ale také na tvaru částic. Celý proces se skládá z několika kroků.

Při *rozplavování* jsou rozpojovány aglomerované částice ve vodě a jsou převedeny do suspenze. Následně dochází k samotnému gravitačnímu *třídění*, a nakonec jsou sedimenty postupně *zahušťovány*.

2.4.3 Větrné třídění

Větrné nebo také vzduchové třídění je založeno na rozdílných rychlostech pádu ve vzduchu. Vzduch unáší melivo ve vymezené dráze a těžší zrna ztrácí rychleji energii a klesají do výsypky pro hrubé zrno. Větrné třídíče umožňují dokonalé rozřídění i nejjemnější frakce a zbavují zrno prachového polštáře. Stejně jako u hydraulického

třídění i u větrného záleží na tvaru částic. Jejich nevýhodou je velká spotřeba tlakového vzduchu.

2.5 Stárnutí (odležování)

Dle ČSN 72 000 je stárnutí neboli odležení samovolný i záměrně řízený pochod, při kterém se u plastických materiálů uložených v klidu v podobě těsta nebo suspenze zlepšují vlastností pro zpracování (plasticita, viskozita, pevnost apod.). Propracované metody stárnutí jílu byly historicky používány např. v Číně, kde surovinu dědily celé generace po sobě. K dostatečnému procesu stárnutí je zapotřebí prostor a dostatečná časová dotace. Moderní provoz výroby není tomuto procesu z ekonomického hlediska přizpůsoben, přesto závody surovinu haldují. (Pán a Jukl 1985)

„Surovina se drtí a mele, načež se halduje v odležárně, odkud se teprve odebírá do výrobní linky. V menších závodech se provádí často haldování nebo přezimování, v některých případech se pro náročnou výrobu provádí i plavení suroviny“³ Haldové skládky mohou mít čtvercový nebo obdélníkový půdorys. V závislosti na velikosti podniku a množství suroviny jsou buď nekryté haldové skládky nebo obezděné vnitřní skládky.

Manipulaci s materiálem obstarává v případě venkovní skládky korečkové rypadlo, které materiál odebírá podél celé délky haldy, a tím ho rozmíchává a homogenizuje. V případě obezděné skládky může manipulaci zajišťovat portálový jeřáb, díky kterému je skladování vysoce automatizované.

Vlastnosti suroviny při skladování kolísají. Jíl se postupně vysušuje v závislosti na vlhkosti vzduchu. V otevřených skládkách kolísá zejména vlhkost. Za teplého počasí se surovina nadměrně vysouší a vyžaduje kropení a za deště se její vlhkost zvyšuje. (Pán a Jukl 1985)

2.6 Technologie manipulace

Manipulace materiálů hraje důležitou roli u technologických linek výroby z různých granulátů a sypkých materiálů. Hlavními požadavky vnitropodnikové dopravy jsou vhodná systémová integrace a spolehlivost. Je třeba zajistit vhodnou logistickou návaznost technologických procesů stávající organizace výroby.

2.6.1 Dopravníky (fill)

Přepravu jílové hmoty lze realizovat zejména pomocí pásového dopravníku. Ten je určen pro přepravu zrnitých, práškových nebo kusových materiálů. Pásový dopravník

³ (Řepka 1998, s. 61)

lze využít i na veliké vzdálenosti (v řádech kilometrů). Surovinu lze dopravovat horizontálně nebo pod mírným sklonem v závislosti na její soudržnosti a přilnavosti.

Pásový dopravník je tvořen pásem, který je napnutý mezi dvěma bubny. Jeden buben je hnací a druhý nosný. Mezi bubny se nachází soustava podpůrných válečků. Pás je napínán pomocí napínacího mechanismu. Doplňky pásového dopravníku jsou nakládací a shazovací zařízení, škrabky pro čištění pásu od přilnutého materiálu.

Pás dopravníku může být hladký nebo různě členitý. (Pán a Jukl 1985) uvádí příklad zvlněného pryžového pásu. Kabelky vyvářené zvlněním nesou materiál i do strmých úhlů 45° až 60°.

Další typy dopravníků:

- Pneumatické
- Vibrační
- Šnekové
- Korečkový

2.6.2 Podavače a dávkovače

Podavače a dávkovače jsou důležité zejména při skladování materiálu v silech.

Šoupátkový podavač – pro jemné hmoty. Kónické dno sila je uzavřeno kuželovým šoupátkem špičkou vzhůru. Snížením šoupěte materiál propadá na dopravní pás. Aby se hrdlo zásobníku nezneprůchodnilo, bývá zásobník doplněn vzduchovým mísičem nebo vibračním čechračem

Komůrkový podavač (někdy též „turniket“) – pod ústím sila je umístěn válec s vyhloubenými jamkami. Otáčením válce jsou objemy materiálu uvnitř jamek odebírány ze sila a odváděny dopravníkovým pásem.

2.7 Mechanické zdrobňování

Mechanické zdrobňování zahrnuje procesy drcení a mletí v různě stanovených sledech. Materiály se zdrobňují pro několik účelů:

- a) Redukce velikosti částic vyráběného produktu dle požadavků navazující výroby, odběratele nebo příslušné normy
- b) Umožnění třídění a rozdružování, neboť dojde k „otevření zrna.“
- c) Získání produktu s velkým měrným povrchem
- d) Speciálně v případě jílových zemin také za účelem homogenizace vlastností (viz ČSN 72 000)

2.7.1 Metriky a názvosloví procesu zdrobňování

Základní metrikou dle (Šebor 1983) je *stupeň drcení*:

$$s = \frac{D}{d} \tag{2.1}$$

kde D je průměr největších zrn před rozpojením a d je průměr největších zrn rozpojeného materiálu. Tato metrika popisuje pouze vztah mezi největšími kusy materiálu a může být snadno zkrácena nedostatečně rozemletými kusy.

Statisticky robustnější metrikou je *redukční poměr*:

$$R_{80} = \frac{D_{80}}{d_{80}}$$

kde D_{80} je průměr kruhového síta, kterým projde 80% hmotnosti materiálu před rozpojením a d_{80} je průměr kruhového síta, kterým projde 80% hmotnosti materiálu po rozpojení. Využitím mlýnů a drtičů s malými hodnotami redukčního poměru je třeba zařadit do výroby více strojů. Toto je třeba zohlednit v rozvaze při návrhu technologií úpravy.

Zdrobňovací procesy lze klasifikovat podle velikosti zrn/kusů produktu. (Šebor 1983) cituje normu ČSN 44 7010, která je klasifikuje do 5 kategorií (viz Tabulka 2.1).

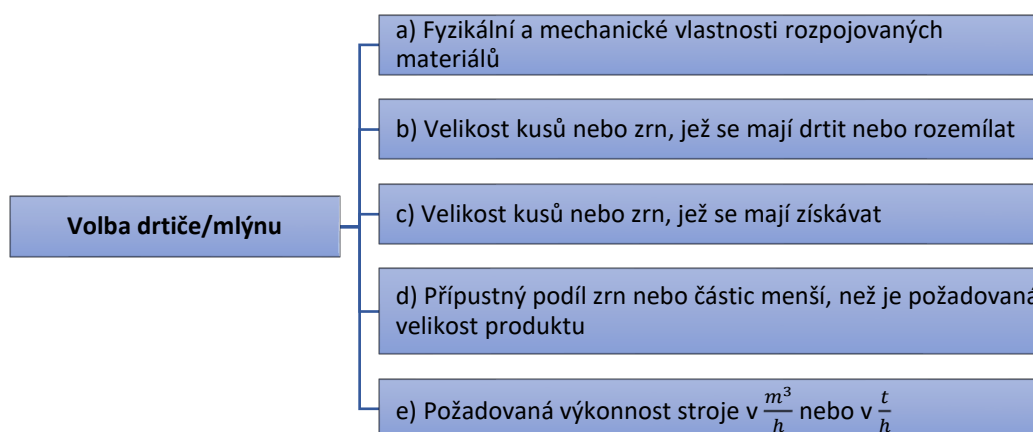
Tabulka 2.1: Historická klasifikace mechanického zdrobňování (Šebor 1983)

Způsob mechanického zdrobňování	Velikost zrn v produktu	[mm]
Hrubé drcení	Zrna převážně větší než	125
Střední drcení	Zrna převážně větší než	25
Jemné drcení	Zrna převážně větší než	25
Mletí	Zrna převážně menší než	1,25
Jemné mletí	Zrna převážně menší než	0,08

Hltnost nebo pohltivost je další metrikou popisující proces zdrobňování a „označuje veškeré množství materiálu procházející drtičem včetně menších zrn.“⁴ Pokud příměs menších zrn vzroste na vyšší podíl, je potřeba taková zrna oddělit a nenechat je projít drtičem zbytečně. Řešením tohoto problému je vhodné umístění technologie třídění materiálu.

2.7.2 Faktory volby drtičů a mlýnů

Pro optimální volbu drtičů a mlýnů je třeba zanalyzovat stav a zvážit faktory viz Obrázek 2.3. U jílových zemin jsou fyzikální a mechanické vlastnosti silně provázané s obsahem vlhkosti, chemickým a mineralogickým složením. U stanovení výkonnosti se přihlíží pouze k materiálu, který je ve stroji skutečně drcen.



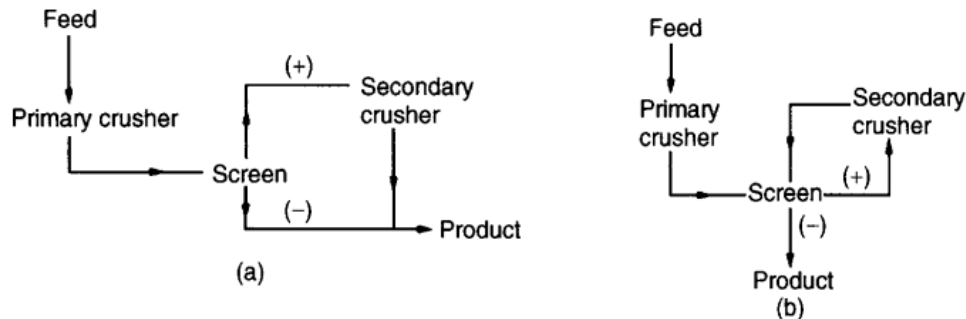
Obrázek 2.3: Rozhodující faktory při výběru technologie zdrobňování materiálu (Šebor 1983)

Proces zdrobňování se skládá z několika fází v závislosti na charakteru vstupní suroviny. Nejprve surovina projde primárním drtičem, a posléze sérií sekundárních drtičů nebo mlýnů. (Wills a Finch 2016) **(Lhoist)** (Verdes)

⁴ (Šebor 1983)

2.7.3 Otevřený a uzavřený okruh zdrobňování

Zdrobňování se provádí buď v otevřeném nebo v uzavřeném okruhu viz Obrázek 2.4.



Obrázek 2.4: (a) Otevřený cyklus (b) Uzavřený cyklus (Wills a Finch 2016)

a) Otevřený okruh

Produkt primárního drcení je tříděn dle velikosti částic. Hrubší částice projdou procesem sekundárního drcení nebo mletí a jsou smíseny s drobnějšími částicemi, které prošly sítí. Otevřený okruh se běžně používá u průběžných fází drcení, kde nejsou velké nároky na tvarovou hodnotu produktu.

b) Uzavřený okruh

Produktem drcení s uzavřeným okruhem je materiál normovaný velikostí otvoru síta. Příliš velké částice vzniklé při primárním drcení jsou ze síta přepraveny k sekundárnímu drtiči a znovu prosety. Velikou výhodou uzavřeného okruhu je příspěvek k celkové flexibilitě výrobní linky. Zrnitost produktu se dá velikostí síta regulovat. Zároveň v případě změny klimatických podmínek a zvýšení vlhkosti a přilnavosti materiálu lze regulovat i drticí poměr nebo pohltivost sekundárního drtiče pro vykompenzování velkého množství cirkulujícího materiálu. (Wills a Finch 2016)

2.7.4 Primární drcení a trhání

Primární drtiče jsou těžké stroje určené k rozrušování nehomogenní natěžené suroviny. Největší kusy vstupní hmoty mohou dosahovat rozměrů až 1,5 m. Charakteristikou primárního zdrobňování je robustnost vůči hlušině. Surovina může obsahovat množství nežádoucích zemin, organických nečistot nebo balvanů, které jsou v procesu rozmělněny nebo vytříděny.

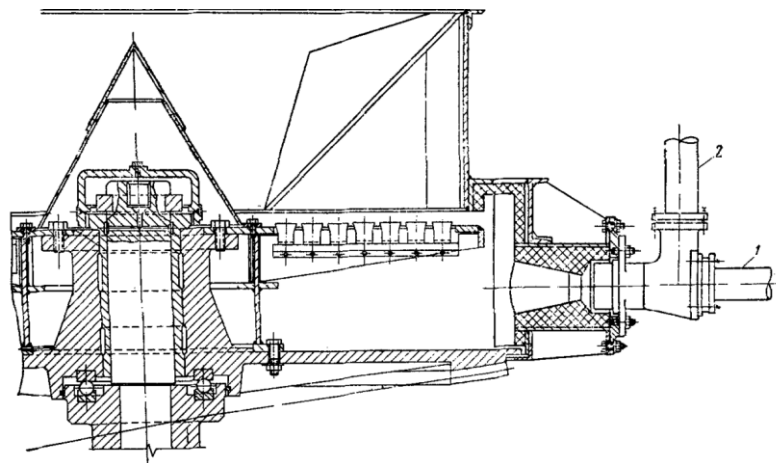
Ve většině provozů je primární drcení synchronizováno s těžbou materiálu. Primární drtiče bývají umístěny poblíž působení těžební techniky. V případě podzemní těžby se můžou nacházet přímo v šachtě. Primární drtiče jsou uspořádány do otevřeného cyklu, často doplněné hrubým přesívacím sítím.

2.7.4.1 Technologie primárního zdrobňování jílu

Primární trhače nebo drtiče jílu jsou umístěny hned za rypadlem. Proto musí snést jílovou surovinu i ve zmrzlém stavu. (Pán a Jukl 1985) Primární drcení může proběhnout opakovaně. Pokud je jíl transportován mezi lomem a závodem, může dojít ke změnám parametrů, které zkomplikují jeho následující zpracování, např. pokud jíl zmokne, zmrzne nebo jinak změní strukturu.

(Losev 1965) uvedl metodu pro zpracování zmrzlého jílu zahříváním částí stroje na 70 až 100 °C. Zahřívání je realizováno buď pomocí plynového ohříváče (Obrázek 2.5), horkým vzduchem ze sušiček nebo elektrickým zdrojem tepla. Alternativou energeticky náročné metody zahřívání materiálu jsou robustní technologie, tedy znovu – robustní válcové trhače, případně princip roztlučení a rozbití nebo lámání.

V případě zmrzlého jílu musí drtič odolat velice nehomogenní plasticitě, teplotě, tuhosti a adhezi materiálu. S tím jsou spojena různá technologická a organizační opatření. Součástí projektu popsaném v (Losev 1965) byl i mechanismus pro čištění nožů trhače poháněný hlavním drticím vřetenem. Ten spočíval v hřídeli nesoucí škrabku stejného profilu jako trhačí disk. S otáčením hřídele škrabka čistila zanesené mezery. Konzistence produktu se řídí pomocí zakladače s nastavitelnou rychlostí podávání materiálu.



Obrázek 2.5: Potrubí pro tepelné médium v drtiči na jíl: 1. Přívod plynu 2. Přívod vzduchu (Losev 1965)

a) Primární válcové drtiče

Primární válcový drtič je určen pro hrubé mletí nebo drcení. Vtahuje surovinu mezi rotující zubový válec a stěnu nebo mezi dva nebo více podélných válců upevněných na rotorech, které se vůči sobě navzájem otáčejí rozdílnou rychlostí. Primární drtič připravuje surovinu nerovnoměrného složení pro jemnější sekundární zpracování. Při průměru válce 1 m dokážou zpracovat kusy o velikosti až 400 mm.

Válce mohou mít různě členité povrchy. Základními variantami jsou zubové (Obrázek 2.6) nebo rýhované. Zubové drtiče mohou mít profil drticích zubů obou válců shodný nebo také odlišný (např. různá délka zubů nebo dopředný sklon). Drticí členy pronikají do materiálu a využívají kombinace tlaku a stříhu k drcení zrn. Každý válec má svůj škrabák, který ho čistí od přilnutého meliva.

K primárnímu drcení se využívají různě členité kratší válce s nízkými otáčkami kolem 40 až 50 min⁻¹ nebo delší válce s vyššími otáčkami až kolem 90 min⁻¹. Při drcení pomalejšími delšími válci převládá drcení suroviny tlakem a stříhem. Rychlejší válce na úkor tlaku a stříhu drtí zejména nárazem.

Ve většině případů vícerotorových drtičů je jeden z rotorů volně uložen a přitlačován pružinou nebo hydraulickým systémem. Jedná se o bezpečnostní opatření v případě vniknutí příliš tvrdé částice. Výjimku tvoří některé řady robustních ozubených drtičů. Každý válec může mít svůj vlastní motor nebo mohou být spojeny ozubeným soukolím nebo řemenicí. Dalším způsobem ochrany proti přetížení je např. střížná spojka na řemenici pohonu. (Pán a Jukl 1985)

Teoretická výrobní kapacita válcového drtiče odpovídá pomyslnému průběžnému bloku, který je opsán rotujícími válci. (Wills a Finch 2016) uvádí vztah pro teoretickou kapacitu:

$$\dot{m}_{teor} = 188.5 \cdot N \cdot D \cdot V \cdot s \cdot d \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (2.2)$$

kde N jsou otáčky válců (min⁻¹), D průměr válců, W délka válců, s specifická hustota podávání materiálu (kg · m⁻¹) a d je mezera mezi válci. Skutečná hodnota kapacity je zhruba na 25 % teoretického toku \dot{m}_{teor} kvůli vzduchu mezi částicemi, rozdílu mezi rychlostmi válců, nehomogenitami apod. Navíc aby se drtič nepřehltl je třeba ho „podvyživit“ (*“roll crushers must be ,starvation fed‘ if they are to be prevented from choking⁵”*). Pokud objemový tok podávaného materiálu přesáhne optimum, stroj je přetížen a posuvný válec ustoupí způsobenému vysokému tlaku. Výsledkem je nevyhovující zrnitost produktu.

Hlavními nevýhodami těchto strojů jsou vysoká míra ulpívání jílu na povrchu výstupků v případě vyšší vlhkosti, snížení efektivity v případě zmrzlého jílu a vysoká míra opotřebení drticích a mlecích ploch. Vlhkost jílu může dosahovat 10–28 %. V zimním období potom vlhký přilnutý jíl na součástech stroje dokonce přimrzá (Losev 1965). Válcové drtiče také nejsou vhodné pro soustavné drcení tvrdých surovin a

⁵ (Wills a Finch 2016, s. 135)

kovových předmětů. Používají se pro drcení zeminy nebo křehkých až středně tvrdých hmot zejména pro hrubé drcení. Drtiče s hladkými válci jsou potom určené pro drcení jemné.

Povrch zubových mlýnů podléhá vysokému opotřebení. Z toho důvodu jsou stroj a jeho režie přizpůsobeny. Drticí zuby jsou vyrobeny z manganové oceli nebo jiných tvrdých a otěruvzdorných materiálů. Válce disponují vyměnitelnými drticími plochami. Plocha válce podél délky musí být zatěžována rovnoměrně, aby povrch válce byl též rovnoměrně opotřebován. Toho může být docíleno pomocí vhodného podávání materiálu do stroje, např. použitím pásového dopravníku o stejné šířce jako délka válce drtiče.



Obrázek 2.6: Zubový dvouválcový drtič (Wills a Finch 2016)

b) Volnoběžný vylučovací válec

Volnoběžný vylučovací válec slouží k vylučování nedrtitelných předmětů. Je tvořen podélnými válci, které se proti sobě vzájemně otáčejí. Jeden válec je hladký a druhý nese šroubovici, která dopraví větší nedrtitelné předměty na okraj stroje, a vyloučí je z procesu. Existuje také varianta se třemi válci, z nichž dva jsou opatřeny šroubovicí a vytvářejí koryto, které vylučuje nežádoucí předměty rychleji. Třetí válec je podávací.

c) Válcový trhač

Stejně jako válcové drtiče i válcové trhače mají dva rotory nesoucí nože, kterými vtahují a trhají jílovou surovinu o velikosti zrna až 500 mm. Rotory se vůči sobě otáčejí nestejnou rychlostí. Nože mohou být uspořádané kaskádovitě (Obrázek 2.7) nebo do šroubovice s pravým a levým stoupáním. Konce nožů jsou vyztuženy pevnějším materiálem (např. tvrdokovem) z důvodu velkého opotřebení, kterému při procesu

podléhají. Jedná se o robustní stroje, které zpracovávají i zmrzlou surovinu. (Pán a Jukl 1985)

Vlhčí jíly přirozeně ulpívají na povrchu nožů. Z toho důvodu se do trhačů instalují také stěrače nožů. Na obrázku Obrázek 2.7 lze také pozorovat tzv. protinože umístěné pod noži.



Obrázek 2.7: Nožový dvourotorový trhač TNV

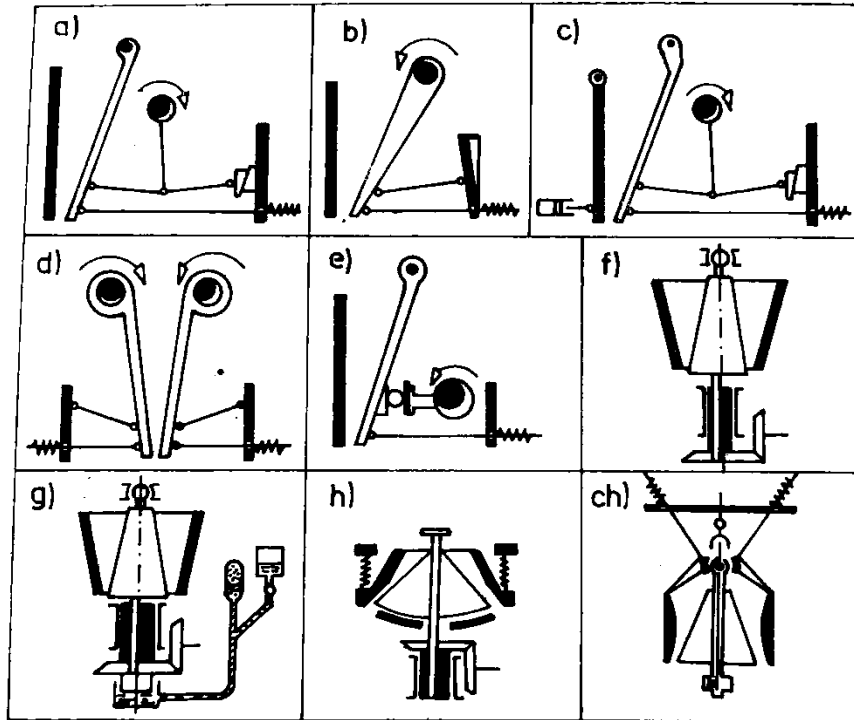
d) Struhač hlín

Struhač hlín umístěn na dvě ocelové silnice. Struhač je tvořen ocelovým talířem s navařenými řezacími noži, který se otáčí na svislém čepu. Nad řezacím talířem je umístěn shrnovací nůž. Krouticí výkon je přiváděn do svislého čepu z externího motoru kuželovým soukolím. Stroj je jištěn proti přetížení spojkou se střížným kolíkem.

2.7.4.2 Technologie primárního zdrobňování hornin

Jedná se obecně o suchý proces. Stejně jako u jílu primární drcení redukuje části rubaniny na velikost 100-200 mm. Části rubaniny v porovnání s jílem mají větší pevnost, tvrdost a mnohem menší přilnavost.

Technologie pro drcení hornin odpovídá jejich vlastnostem. Stroje primárního drcení jsou velice robustní a přizpůsobené drcení tvrdých balvanů. Konstruktivní prvky těchto strojů jsou převážně odlitky z tvrdých houževnatých materiálů jako manganová ocel nebo Ni-Cr (Wills a Finch 2016).



Obrázek 2.8: Přehled druhů drtičů hornin

a) Čelistové drtiče

Jako primární drtiče se využívají např. čelistové dvojjzperné drtiče (Obrázek 2.8a, c). Princip čelistového drtiče připomíná skutečné čelisti. Jedna čelist je (zpravidla) fixovaná a druhá příklopná. Materiál je přiváděn do prostoru mezi čelisti a redukován prochází vymezeným propadem. Jedná se o velice výkonné a robustní stroje, které vyžadují mohutné základy. Dvojjzperné čelistové drtiče „se využívají pro drcení velmi tvrdých a velmi pevných a popřípadě i abrazivních hmot. Nehodí se však pro drcení hmot vlhkých a mazlavých“⁶

b) Kuželové ostroúhlé drtiče

Zástupci primárních kuželových drtičů jsou ostroúhlé kuželové drtiče (viz Obrázek 2.8f), opět v případě velice tvrdých vstupních materiálů. Dlouhé vřeteno s kónickou drticí hlavou rotuje v kuželové drticí komoře. Oproti čelistovým drtičům nejsou čelistové tvarově přizpůsobeny příjmu velkých bloků hornin. Nicméně vyznačují se vyšší výkoností a klidným chodem, díky čemuž není třeba robustních základů jako v případě dvojjzperných čelistových drtičů. Kuželové drtiče mívají hydraulická zařízení pro regulaci šířky výpustné komory.

⁶ (Šebor 1983) str 71

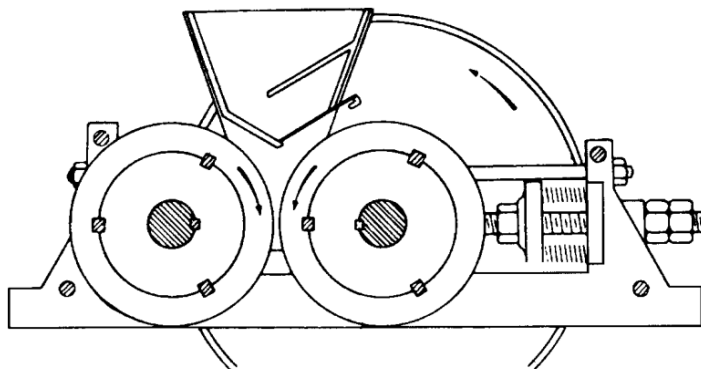
2.7.5 Sekundární drcení

Sekundární zpracování je proces finálního rozmělnění suroviny dle potřeby výroby. Jedná se o proces primárně synchronizovaný s výrobní linkou, proto sekundární drtiče a mlýny zpravidla tvoří součást výrobní linky. Vstupní surovina sekundárního drcení obsahuje částice menší než 150 mm a je redukována na potřebnou hrubost dalších procesů výroby, běžně 5-20 mm. (Wills a Finch 2016)

2.7.5.1 Technologie sekundárního zdrobňování jílu

a) Sekundární válcové drtiče a mlýny

Pro sekundární zpracování jílu je vhodný válcový drtič s hladkými nebo rýhovanými válci. Válce se otáčejí proti sobě otáčí buď shodnou nebo neshodnou rychlostí. Válce mají zpravidla větší průměr než délku, přičemž největší používaný průměr je 1500 mm. (Pán a Jukl 1985). Na rozdíl od primárního drcení se používají válce rychle se točící, běžně rychlostí 180 min⁻¹. Vedle hnětení a zdrobňování plastických materiálů jako je jílu, se válcové drtiče používají také na jemné drcení středně tvrdých rud a jiných hornin. Válcový drtič je proto ideální pro sekundární drcení jílu s drobnými středně tvrdými nečistotami.



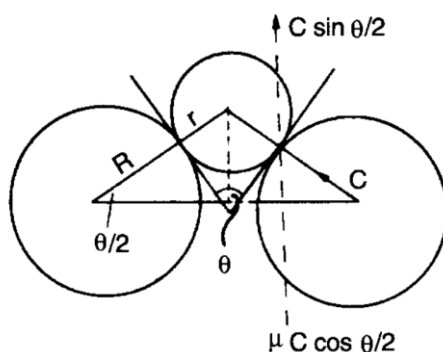
Obrázek 2.9: Válcový drtič (Wills a Finch 2016)

Jedná se o jednoduchý a provozně spolehlivý stroj, který ale není příliš výkonný a nemá příliš velký redukční poměr. Zpravidla hodnota redukčního poměru nepřesahuje hodnotu 4 z důvodu omezené velikosti válců. (Wills a Finch 2016) uvádí vztah pro odvození třecího úhlu mezi drcenou částicí a hladkým válcem.

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{R + a}{R + r} \quad (2.3)$$

kde θ je třecí úhel, R poloměr válce, a redukční poměr a r je poloměr drcené částice. Geometrické schéma procesu je definováno viz Obrázek 2.10. Hodnota třecího úhlu pro drcení kamenů a dalších pevných částic nebo nečistot, které mohou být

součástí jílové zeminy, dosahuje zpravidla nejvyšších hodnot kolem 20° až 30°. Na základě tohoto předpokladu a Rovnice (2.3) lze vyjádřit závislost maximálních rozměrů drcených částic v závislosti na redukčním poměru a velikosti válce viz Tabulka 2.2.

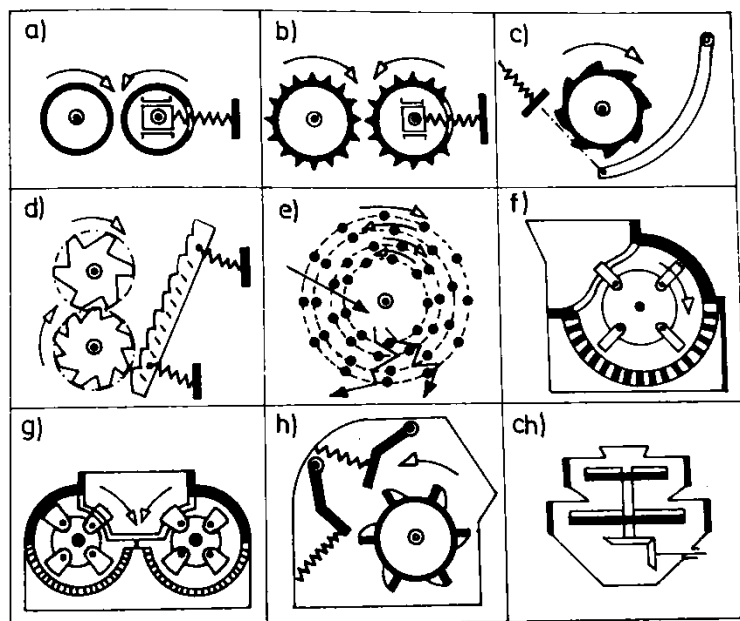


Obrázek 2.10: Rozklad sil na částici při drcení válcovým drtičem

Tabulka 2.2: Maximální rozměr kamenů drcených hladkým válcovým drtičem ve vztahu s redukčním poměrem (Wills a Finch 2016)

Průměr válce [mm]	Maximální rozměr drcených kamenů [mm]				
	Redukční poměr [-]				
	2	3	4	5	6
200	6.2	4.6	4.1	3.8	3.7
400	12.4	9.2	8.2	7.6	7.3
600	18.6	13.8	12.2	11.5	11.0
800	24.8	18.4	16.3	15.3	14.7
1000	30.9	23.0	20.4	19.1	18.3
1200	37.1	27.6	24.5	22.9	22.0
1400	43.3	32.2	28.6	26.8	25.7

....



Obrázek 2.11: Válcové a odrazové drtiče (Šebor 1983)

2.7.5.2 Technologie sekundárního zpracování hornin

Sekundární drcení a mletí redukuje velikost částic rubaniny na 5-20 mm

a) Čelistové drtiče

Jednovzpěrné čelistové drtiče (viz Obrázek 2.8b) jsou ve srovnání s dvojevzpěrnými mnohem lehčí a konstrukčně méně náročnější. Jejich čelist vykonává složitější pohyb a výsledný produkt má vyšší tvarovou hodnotu. Bývají také označovány jako granulátory.

b) Kuželové tupouhlé drtiče

Jako sekundární se využívají tupouhlé kuželové drtiče (viz Obrázek 2.8h). Ty jsou určeny pro finální drcení opět velmi tvrdých materiálů. „Drtiče s prodlouženým úsekem, v němž jsou plochy drticího kužele a drticího pláště téměř rovnoběžné, dávají produkt s vysokou stejnoměrností zrnění a s příznivou tvarovou hodnotou. Označují se jako kuželové granulátory.“⁷

c) Válcové drtiče pro drcení hornin

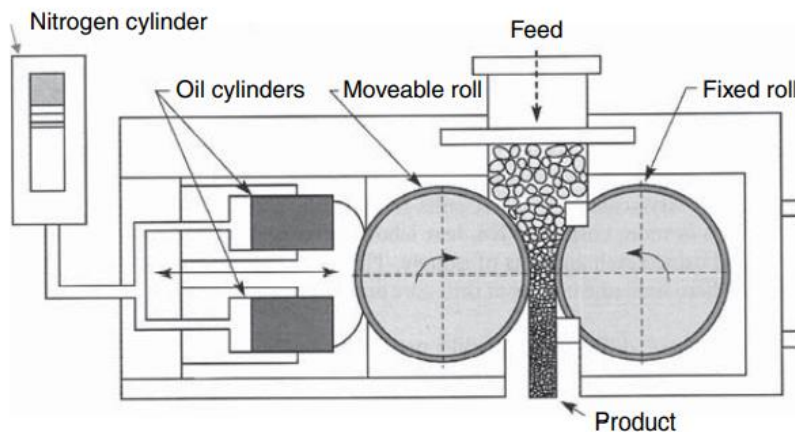
Stejně jako u jílu je možno k sekundárnímu drcení hornin použít jednoválcové (Obrázek 2.11c) či dvouválcové drtiče s hladkými (Obrázek 2.11a), ozubenými (Obrázek 2.11b) či jinak členěnými válci. Dle (Wills a Finch 2016) se jedná o méně běžnou technologii pro drcení hornin. Jejich velkou výhodou je možnost zpracování přilnavých,

⁷ (Šebor 1983) str. 74

zmrzlých nebo drobných surovin (uhlí, vápenec, sádrovec apod.). Nevýhodou je malý redukční poměr.

e) Kompresní válcové trhače

Alternativou válcových drtičů pracujících pod tlakem zhruba 10 až 30 MPa jsou kompresní válcové trhače. Hydraulický systém tlačí na posuvný válec proti podávanému materiálu. Tyto drtiče pracují při tlacích přes 50 MPa. Produktem je stlačený blok obsahující jemné částice a zrna. Produkt je dále rozemlet pomocí kulového mlýnu. Díky kompresnímu mlýnu je tento proces energeticky efektivnější. Kompresních mlýnů se využívá zejména pro drcení cementu, sádrovce nebo u kovových rud (Wills a Finch 2016).



Obrázek 2.12: Kompresní válcový drtič (Wills a Finch 2016)

d) Odrazové drtiče

Odrazové drtiče fungují na principu drcení úderem částice drticím členem při vysoké rychlosti. Při nárazu vzniknou v horninách vnitřní napětí, která způsobí tříštění částic. Tyto účinky jsou umocněny nárazem urychlených částic drticí desku. Vedle nárazů částic na součásti stroje probíhá též obroušování částic navzájem.

Sekundární drcení odrazovými drtiči je vhodné zejména k drcení snadno až středně drtitelných rud (uhlí, vápenec, sádrovec apod.). Hodí se v případě rud, které se při pomalém stlačování chovají plasticky. Velkou výhodou je malá poruchovost, jednoduchá konstrukce a vysoký stupeň drcení. Dají se v případě vhodného materiálu použít i jako drtiče primární. Jedná se o suchý proces. Vlhkost suroviny by neměla přesáhnout 10 %.

Hlavním rozdílem mezi kompresními způsoby drcení (čelistové, válcové, kuželové...) a odrazovými je zbytkové pnutí. Odrazové drtiče způsobí rozpad zrn suroviny bez zbytkových pnutí, kdežto kompresní metody pnutí zanechávají. To může

později způsobit rozpad produktu na drobnější zrna. To je zejména potřeba ve stavebnictví.

Kladivové drtiče. Drticími členy na rotoru drtiče jsou kladiva, viz Obrázek 12f, g. Drticí členy se vyrábí z manganové oceli nebo z litiny s kuličkovým grafitem s obsahem karbidu chromu, který se vyznačuje vysokou otěruvzdorností. Kladiva jsou vůči rotoru otočná. Oproti vetknutí vyvinou otočná kladiva menší sílu, ale ustoupí zrnům nežádoucí velikosti nebo kovovým předmětům.

Odrazové drtiče a mlýny. Drticími členy na rotoru drtiče jsou drticí lišty (viz Obrázek 12h). Ty jsou symetrické, aby se daly otáčet pro vyrovnání opotřebení. Odrazové mlýny jsou velice podobné kladivovým. Hlavním rozdílem je vetknutí drticích lišt do rotoru. Dalším rozdílem je podávání materiálu. U odrazových je materiál podáván tečně na drticí válce.

e) Metací drtiče

Metací drtiče jsou určeny zejména pro drcení uhlí. Principem drcení je pouze náraz na drticí desku, proti které je surovina je různými způsoby metána. U *vertikálních odrazových* drtičů je axiálně podávána na rotující disk, který ji proti drticí desce vymrští. *Pneumatické metací* mlýny zase vrhají materiál na drticí desku pomocí proudu stlačeného vzduchu.

2.7.6 Mletí a terciární drcení

Dle ČSN 72 000 mletím rozumíme zdobňování na zrna převážně menší než 1,25 mm. Existuje několik módů mletí. Základním rozdělením mletí je rozdělení na kontinuální nebo periodické, posléze na mokré nebo suché.

Mletí nebo terciární drcení slouží k jemném mletí surovin.

Nízký drticí poměr, energeticky náročné.

2.7.6.1 Kolíkové drtiče

Kolíkové drtiče neboli dezintegrátory jsou zvláštním druhem úderových mlýnů. Používají se pro jemné drcení rubanin, mletí střeptů nebo plastických surovin jako kaolín nebo jílu. Pro drcení tvrdších surovin se prakticky nepoužívají z důvodu strmého nárůstu energetické náročnosti. V případě vniknutí nedrtitelných předmětů do stroje hrozí i jeho zničení. Vlhkost suroviny by neměla přesáhnout 12 %.

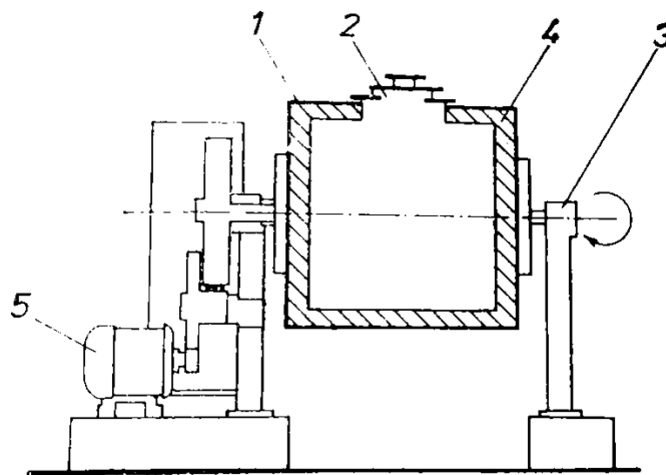
Kolíkové drtiče se skládají ze statorového a rotorového disku, které do sebe zapadají. V případě vyššího výkonu je možné použít i dvourotorový stroj. Disky mohou být buď kolíkové, nosové nebo křížové. Oba disky obsahují několik řad kolíků, které se

v radiálním směru od středu disku střídají. Surovina je buď samospádem nebo podavačem přivedena do středu disků. Vzájemně se pohybující zuby surovinu rozdrťí a ta odstředivou silou nebo samospádem opouští mlecí prostor. Schéma mletí je znázorněno na obrázku Obrázek 2.11e.

2.7.6.2 Bubnové mlýny

Bubnové mlýny slouží k velice jemnému mletí zejména keramických surovin. Tvoří důležitou součást výrobního řetězce porcelánu. Mohou splňovat také funkci mísiče. Pokud produkt mletí je směsí plastických a neplastických surovin, potom jsou přednostně mlety neplastické následovány surovinami plastickými. Zrnitost produktu dávána zbytkem na síť by měla dosahovat alespoň hodnoty 4% pro síto 0,06 (10 000 ok na 1 cm²) (Pán a Jukl 1985)

Bubnové mlýny podle technologického využití lze rozdělit na mlýny pro mokré nebo pro suché zpracování.



Obrázek 2.13: Bubnový mlýn MBM (Pán a Jukl 1985)

a) Bubnové mlýny na mokré mletí

Při mokrém mletí je surovina v bubnových mlýnech smíchána s vodou a uzavřena. Buben se otáčí kolem delší osy. Směs je mleta volně padajícími mlecími tělesy. Mlecí tělesa mohou být koule vyrobené z porcelánu, popř. pazourkové oblázky. Plášť bubnu je vyroben z oceli a jeho vnitřek je vyložen tvrdou porcelánovou nebo čedičovou vyzdívkou. Účelem vyzdívkou je, mimo ochrany stroje před otěrem, zabránit kontaminaci meliva železem.

Princip mletí spočívá v nárazech a tření mlecích těles s melivem. Efekt mletí nárazem se postupně se zdrobňováním utlumuje a převládá mletí třecí. Při optimální rychlosti otáčení bubnu jsou mlecí tělesa a surovina vynášeny otáčející se stěnou do

horní části, odkud padají do části spodní. Pokud je otáčení příliš pomalé, surovina je pouze promíchávána. Pokud je otáčení naopak příliš rychlé, směs se v horní části přestane oddělovat kvůli zvýšené odstředivé síle. V obou krajních případech mletí neprobíhá.

Hlavními faktory ovlivňujícími zrnitost produktu jsou

- Doba mletí
- Hmotnost těles
- Rychlost otáčení
- Stupeň plnění mlýnu (více naplněný mlýn mele hruběji)

b) Bubnové mlýny na suché mletí

Jemné mletí materiálů za sucha. Stejně jako u mlýnů na mokré mletí, tvrdá vyzdívka (porcelán, silex, ...) zabrání kontaminaci meliva železnými pilinami. Mlecími elementy jsou také např. porcelánové koule či pazourkové oblázky. Mletí za sucha je velice prašný proces, proto jsou suché mlýny uzavřeny v neprodyšném plášti vybaveném odsáváním vzduchu. Materiál k mletí je přiváděn z jedné strany dutým čepem a odváděn je výsypkou nebo protějším dutým čepem. Mlýn na suché mletí lze provozovat nepřetržitě. Výpustní otvor bývá osazen roštem, který drží mlecí elementy uvnitř i při vypouštění produktu.

Princip mletí spočívá v nárazech mlecích elementů na částice meliva. Náplň mlýnu musí být zvolena tak, aby částice meliva vyplňovaly mezery mezi mlecími elementy.

2.7.6.3 Vibrační bubnové mlýny

Suroviny je podávána do mlecího bubnu. Ten vykonává vibrační pohyb a dochází opět k tření a nárazům částic. Vibrační mlýny melou surovinu až do zrnitosti v řádech mikrometrů.

2.7.6.4 Hrnkové mlýny

Hrnkové mlýny jsou tvořeny soustavami malých porcelánových nádob. Ty jsou naplněny melivem a umístěny na otáčející se válce masivního stojanu. Nádoby jsou uzavřeny speciálními rychlouzávěry. Tyto mlýny jsou určeny pro mletí malých množství suroviny.

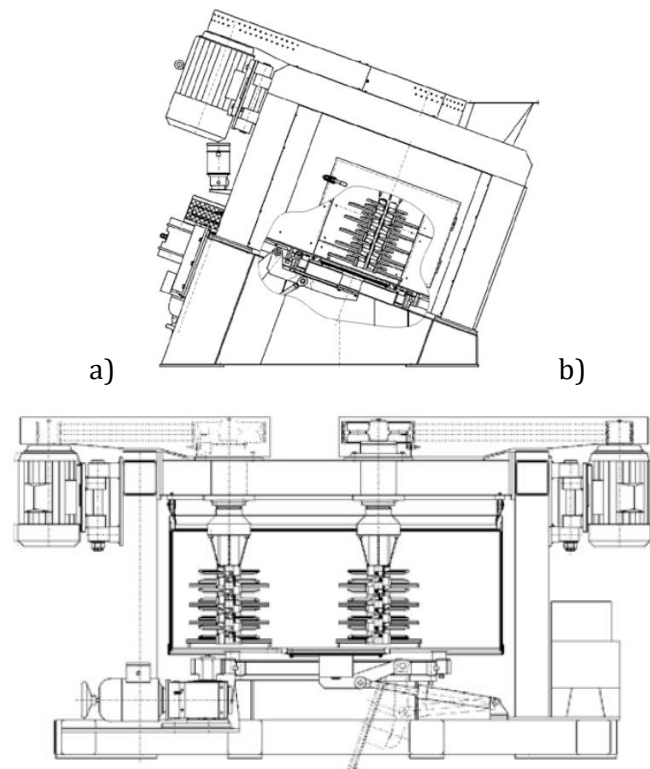
2.8 Mísení

Mísení je záměrný nebo samovolný pochod vedoucí ke vzniku směsi dvou nebo více látek o žádaném stupni homogenity. Mísení jednotlivých složek v průběhu úpravy suroviny je velice běžná. Z toho důvodu jsou ve výrobním řetězci zařazeny tzv. mísiče, které realizují mísení surovin nejčastěji pomocí míchání. Mísiče míchají složky až do požadované homogenity pro dosažení kýžených vlastností. Do směsi v mísiči lze též přidat předepsané množství tekutiny nebo měnit její teplotu. Základními požadavky na technologie míchání jsou vysoká homogenita, reprodukovatelnost, krátký čas míchání nebo možnost míchání různých receptur směsí.

2.8.1 Vířivé mísiče

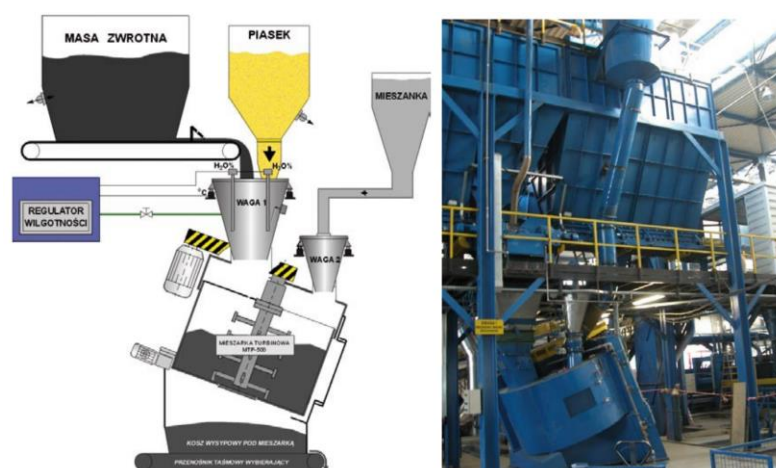
Vířivý mísič je jeden z nejrozšířenějších typů mísičů, který se používá ve sklářském, keramickém a stavebním průmyslu, ale také při výrobě zárovzdorných materiálů. Přemísťování částic materiálu je realizováno jednou nebo dvěma rychloběžnými turbínami v kombinaci s otáčením mísy, viz Obrázek 2.14. (Bajer et al. 2013)

U mísiče se skloněnou osou otáčení je materiál vynášen do vrchní části mísy a při volném pádu zpět rozmetáván otočnou turbínou proti směru otáčení. U vodorovné osy se běžně vyskytují dvě rychloběžné turbíny, které se otáčejí vůči sobě naopak. Materiál odhazovaný jednou turbínou je otáčením mísy přiveden do pracovního prostoru druhé turbíny proti směru otáčení mísy. Materiál se hromadí kolem první turbíny, díky čemuž se do jejího pracovního prostoru dostávají vzájemně smíšené složky.



Obrázek 2.14: Vřířivý míšič s otočnou mísou a) se skloněnou osou otáčení b) se svislou osou otáčení (Bajer et al. 2013)

Příprava směsi se odvíjí od vlastností směřovaných surovin. Výsledek projektování procesu směřování prezentuje firma TECHNICAL Nowa Sól, viz Obrázek 2.15. Řešení zahrnuje dávkování sypkých a tekutých složek směsi, které jsou dávkovány dávkovači a naváženy pomocí elektrických vah, zásobníky se sondami hladin, kontrolní měřicí aparaturu pro regulaci vlhkosti materiálu nebo integrovaný elektronický systém pro řízení a monitorování procesu přípravy směsi..



Obrázek 2.15: Systém přípravy formovací směsi (Bajer et al. 2013)

2.9 Sušení

V kapitole g) byla popsána důležitost kontroly vlhkosti jílové směsi. Ta může kolísat z důvodu sezonní vlhkosti, nešetrné přepravy, nevhodného skladování apod. Pokud vlhkost přesáhne maximální mez navazujícího výrobního celku, je třeba materiál vysušit. Sušení je také důležitou součástí mokrého zpracování suroviny.

„Sušení je fyzikální děj, při kterém se účinkem tepla snižuje obsah vlhkosti v surovinách, aniž se mění jejich chemické složení.“⁸ Vlhkost se běžně odstraňuje vypařováním nebo sublimací. Při větším obsahu nevázané vody lze odstranit vlhkost i mechanicky – odstředění, dekantace, filtrace. Základními druhy sušení jsou:

- a) *Přirozené* – venkovní nebo po přístřeškem, nevýhodou je malá rychlost a potřeba prostor
- b) *Umělé* – ve speciálních sušičkách, při kterém se podmínky vytvářejí uměle

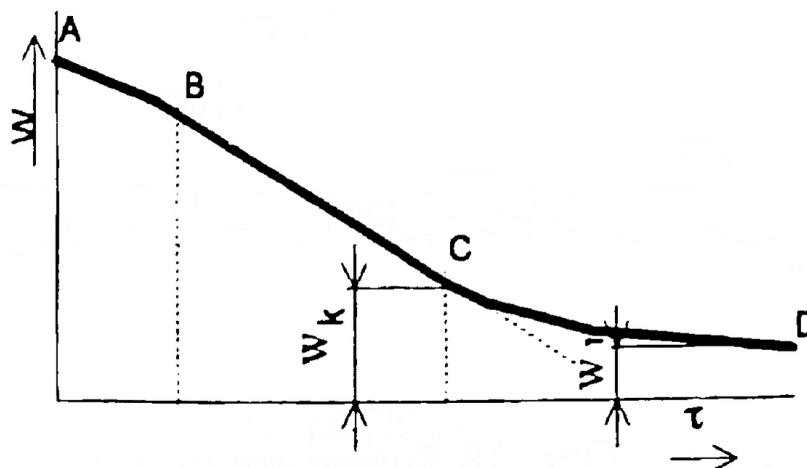
2.9.1 Průběh sušícího procesu

Proces sušení zemin má základní tři fáze: (Řepka 1998)

Fáze A-B: postupně vzrůstající rychlost sušení z hodnoty samovolného vysoušení na hodnotu cílové rychlosti procesu

Fáze B-C: ustálená rychlost sušení a teplota, probíhá difúze vody do suššího plynu, dokud vztlínavost dodává vodu k povrchu; v bodě C je dosaženo kritické měrné vlhkosti materiálu W_k

Fáze C-D: rychlost odpařování se snižuje, teplota materiálu se asymptoticky blíží teplotě prostředí



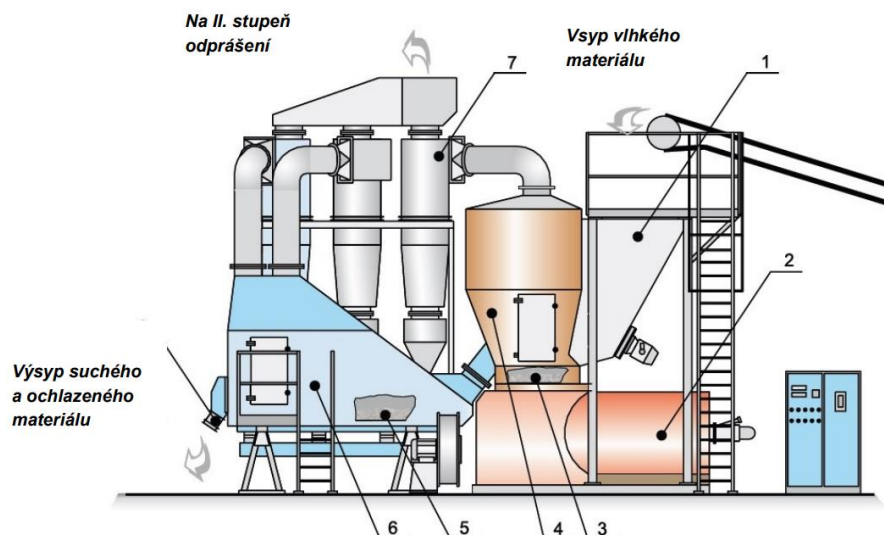
Graf 2.1: Křivka sušení materiálu (Řepka 1998)

⁸ (Řepka 1998) str. 50

2.9.2 Fluidní sušičky

Moderní metoda vhodná zejména pro sypké zrnité materiály se zrnitostí mezi 0,08 a 2 mm nebo obecně materiály, které je možné uvést do stavu vlnosu. Jedná se o metodu s poměrně nižší spotřebou energie oproti ostatním metodám. Její konkurenceschopnost vzrůstá s mírou používání dalších moderních metod jako např. vibrofluidizace.

Fluidní sušičky lze provozovat kontinuálně a celý proces je dvoustupňový. První fáze probíhá v sušicí komoře. Zde směs horkého vzduchu se spalinami proudí skrz fluidní přepážku a materiál. Tím je způsoben vlnos (fluidizace) a intenzivní turbulence materiálu a dojde k odpařování vody. Druhá fáze probíhá v chladicí komoře, kam je přiveden vzduch stejným způsobem a opět dojde ke fluidizaci. Tentokrát se jedná o vzduch studený, který zároveň zchladí materiál na požadovanou teplotu (10 až 15 °C nad teplotou okolí). Konečný vysušený materiál je zbaven drobných frakcí. (Bajer et al. 2013)



Obrázek 2.16: Schéma fluidní sušičky, 1 – dávkovací zásobník, 2 – topeniště, 3 - fluidní přepážka I, 4 – sušicí komora, 5 - fluidní přepážka II, 6 – chladicí komora, 7 – cyklony, 8 - výsyp suchého a ochlazeného materiálu (Bajer et al. 2013)

3 Metody a technika měření při zpracování jílu

V jednotlivých fázích výrobního procesu je zapotřebí o materiálu sbírat množství dat, která přímo ovlivňují stanovení výrobních podmínek nebo pomocí nich lze zjistit, zda materiál odpovídá normovaným hodnotám. Např. průběžné měření vlhkosti jílu je potřeba pro vhodné mísení složek a přídatné vlhkosti. Měření mohou být buď dávková nebo kontinuální. Dávková měření spočívají v odebrání vzorků a jejich analýze, která je z drtivé většiny destruktivní. Obecně tato měření jsou časově náročnější a dosahují vysokých přesností. Kontinuální měření nevyžadují odebrání vzorků. Měření je provedeno pomocí sondy, která snímá danou vlastnost podél toku materiálu. Kontinuální metody jsou schopné měřit v reálném čase, nýbrž jejich přesnost je kolísavá, běžně z důvodu nehomogenity materiálu, změny prostředí apod. Přehled vybraných metod pro měření jílu je uveden v Tabulce Tabulka 3.1.

Tabulka 3.1: Přehled materiálůvých zkoušek a měření jílu

Kategorie	Měřená veličina	Metoda
Dávkové	Vlhkost	Gravimetrická
		Kapacitní
		Neutronová sonda
	Složení	Spektroskopická
		Optická inspekce
	Mineralogický rozbor	Rentgenová spektrometrie
	Zrnitost	Sítový rozbor
		Sedimentační
		Optická/laserová
	Žárovzdornost	Žároměrková
Hmotnost	Přerušované vážení	
Plasticita	Pfefferkornova metoda	
	Indentační metoda	
Kontinuální	Vlhkost	Mikrovlnná
		NIR/IR/NMR
		TDR (reflektometrie)
	Zrnitost	Optická
	Hmotnost	Dopravníková váha
	Velikost zrna	Optické kontinuální měření
Akustické měření		

3.1 Měření vlhkosti

Tradiční přístupy měření vlhkosti jsou založené na změnách fyzikálních vlastností vzorků. Těmi jsou hmotnost, objem, tepelná vodivost, hustota, index lomu, tlak nasycených par a jiné. Moderní přístupy využívají unikátních vlastností molekul vody. Těmi jsou polarita, vibrace vazby O-H skupiny nebo magnetismus vodíkových nukleonů (protony). Využitelnost v keramickém průmyslu je však různá. Nejpoužívanější metody zde jsou založeny na pozorování tepelné vodivosti, hustoty, a především gravimetrické metody.

3.1.1 Gravimetrická metoda

Gravimetrická metoda je založena na měření ztráty hmotnosti připisované poklesu vlhkosti. Poklesu vlhkosti se dosahuje zahřátím směsi, sušením mrazem, desorpčí vlhkosti pomocí ofukování suchým inertním plynem, odstřediváním atd. Pokles vlhkosti a měření mohou probíhat buď simultánně (např. TGA neboli thermogravimetric analysis) nebo po fázích, jako tomu je u standardní metody vysoušení v peci.

Gravimetrická metoda je popsána také normou ČSN 72 1565-1. Pro stanovení technologické vlhkosti, tj. vlhkost stanovená pro technologické účely, norma předepisuje sušení zkoumaného vzorku v laboratorní sušárně s regulací teploty do $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Zahřátý vzorek se nechá zchladnout na teplotu okolí v exsikátoru s vysoušecí náplní a nechá se zvážit. Cyklus zahřívání, chlazení a vážení se opakuje, dokud se dvě vážení po sobě neliší o méně nebo rovno 0,1 % původní hmotnosti.



Obrázek 3.1: Váhy s ohřevem pro měření vlhkosti pomocí gravimetrické metody

Metoda vysoušení v peci je hojně využívanou metodou v keramickém průmyslu. Jedná se o velice levnou a přesnou variantu. Slouží dokonce ke kalibraci ostatních metod, ačkoli se jedná o destrukční a dávkově omezenou metodu, která se nedá použít online. Úskalím metody je fakt, že ne veškerý úbytek hmotnosti při vystavení vysoké teplotě může být přisouzen vlhkosti. Je třeba zohlednit několik faktorů: (Wang 2000)

- a) Správná teplota – obvyklou volbou teploty je $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při této teplotě se ale nevypařuje pouze voda.
- b) Chemické reakce při dané teplotě – při teplotě sušení mohou probíhat reakce, které mění hmotnost materiálu, např. oxidace povrchu. Zejména jde tedy o faktor důležitý pro sušení v přítomnosti atmosféry.
- c) Adsorpční korekce při chlazení – před vážením vzorky chladnou a při chlazení probíhá adsorpce, která musí být kompenzována
- d) Difúze a mikroskopická struktura – při zahřívání materiálu mohou vznikat trhliny a póry, které zadržují vodu a mohou zásadně zkreslit odhad obsahu vlhkosti.

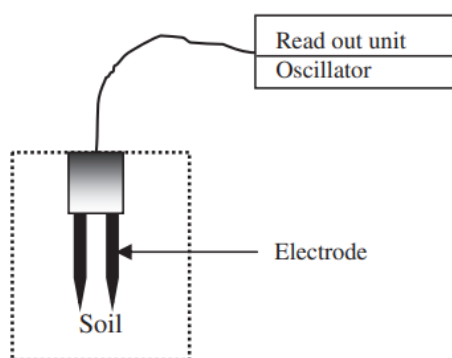
3.1.2 Dielektrické metody

Jedná se o metody, které k měření množství vlhkosti v materiálu využívají silnou závislost permitivity materiálu na přítomnosti vlhkosti. Vazba O-H molekuly vody má charakteristický úhel $104,45^{\circ}$ a vysokou elektronovou hustotu poblíž atomu kyslíku. Tím molekula získává vysoký dipólový moment $6,7 \cdot 10^{-30}\text{ C} \cdot \text{m}$ a také vysokou relativní permitivitu 78,54 při teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vysokou relativní permitivitu molekul vody využívá

několik metod klasifikace vlhkosti. Příkladem jsou elektrické nebo elektronické metody (kapacitní, impedanční apod.), které využívají měřitelných změn elektrické nebo tepelné vodivosti vzorku. Dále jsou to také různé metody reflektometrické. (Wang 2000) (Susha Lekshmi et al. 2014)

3.1.2.1 Kapacitní metoda

Kapacitní metoda měření vlhkosti se řadí mezi elektrické metody. Skládá se z oscilujícího elektrického obvodu a senzoru, který je od oscilátoru dělen vrstvou materiálu. Tato technika stanovuje permitivitu materiálu prostřednictvím určení času nabití kondenzátoru, jehož dielektrikum je tvořeno vrstvou materiálu.



Obrázek 3.2: Schéma kapacitního senzoru vlhkosti

Kapacitní metoda je velice jednoduchá, levná a rychlá. Její nevýhodou je vysoká specifická měření, tudíž senzor je nutno často kalibrovat. V případě trhlin v materiálu je také výsledek ovlivněn, proto musí měřený materiál být pro měření vhodně připraven, zejména v případě expanzních zemin s vysokou mírou tvorby trhlin. (Susha Lekshmi et al. 2014) (Fityus et al. 2011)

3.1.2.2 Reflektometrie v časové oblasti (TDR)

Susha Lekshmi et al. (2014) uvádí metodu reflektometrie v časové oblasti (*time domain reflectometry*) jako široce využívanou metodu měření vlhkosti zeminy. TDR určuje zdánlivou hodnotu permitivity prostředí podle rovnice (3.1),

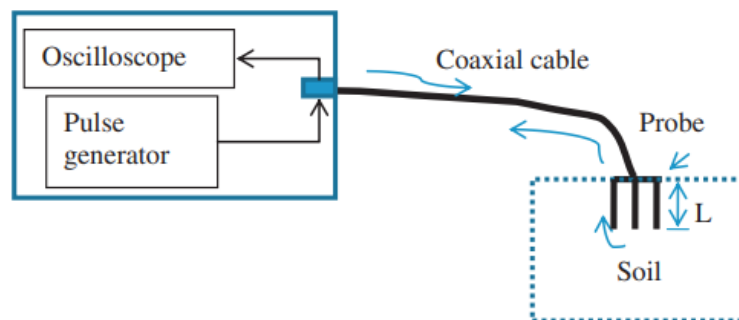
$$K_a = [c \cdot t / 2L]^2 \quad (3.1)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, t je naměřený čas přenosu elektromagnetického pulzu podél délky sondy L . Z důvodu velikého rozdílu permitivity vlhkosti a okolního materiálu je objemová koncentrace vlhkosti θ citlivá vůči výsledné permitivitě a dá se matematicky aproximovat (Susha Lekshmi et al. 2014):

$$\theta = 4,3 \cdot 10^{-6}(k_a)^3 - 5,5 \cdot 10^{-4}(k_a)^2 + 2,92 \cdot 10^{-2}(k_a) - 5,3 \cdot 10^{-2} \quad (3.2)$$

Komplexnější měření lze provést prostřednictvím vyjádření komplexní hodnoty permitivity, k jejíž reálné hodnotě se řadí komplexní část. Ta je závislá na použité frekvenci měření a konstantách prostředí.

Výhodami TDR jsou vysoké rozlišení, vzhledem k přesnosti relativně rychlé měření (~28 s) a opakovatelnost. Dá se snadno automatizovat a je poměrně robustní vůči teplotě, obsahu soli nebo struktuře materiálu. Nevýhodami jsou vysoké pořizovací náklady, snížení účinnosti při vyšším obsahu solí a vyšší vlhkosti.

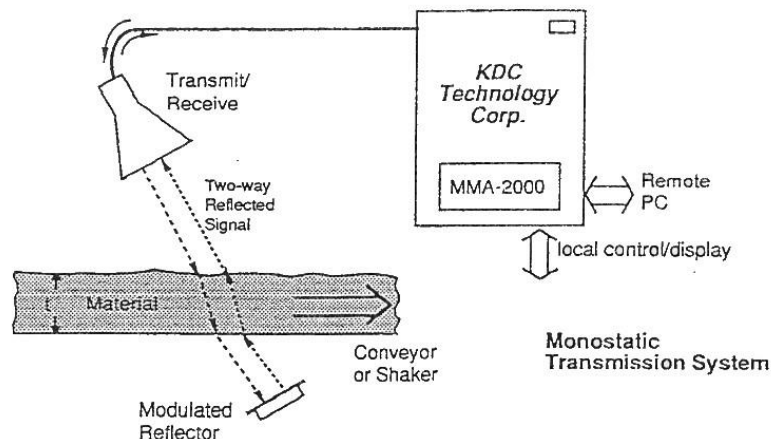


Obrázek 3.3: Schéma zapojení sondy pro TDR měření vlhkosti (Susha Lekshmi et al. 2014)

3.1.2.3 Mikrovlnné metody

Mikrovlnné metody měření vlhkosti využívají zdroj mikrovln pro měření změny fáze, poklesu výkonu, frekvenční posuv nebo tlumení vlnění rezonátoru v důsledku permitivity vody přítomné v materiálu. Jedná se o levnou a jednoduchou nedestruktivní metodu. Nevýhodou je případ měření vlhkosti v materiálu s permitivitou o podobné hodnotě jako voda.

K samotnému měření existuje řada provedení senzorů (Wang 2000). Sensory jsou buď kontaktní nebo bezkontaktní, ale všechny techniky jsou určeny k měření hromadnému. Mikrovlnné senzory mohou být použité též k mapování distribuce vlhkosti ve vzorku.



Obrázek 3.4: Schéma obousměrného mikrovlnného měřicího systému

3.1.2.3.1 Bezkontaktní

Zdroj a přijímač vlnění mohou být na opačné nebo stejné straně vzorku. Vyslaný signál projde materiálem a dojde k jeho detekci přijímačem. Dojde k jeho analýze a vyhodnocení změn fáze a poklesu energie. Vysílač může fungovat také jako přijímač. Systém znázorněný na obrázku Obrázek 3.4 obsahuje zdroj, který funguje jako přijímač a zachycuje vlnění. Vyslaný mikrovlnný signál projde skrz materiál, je odražen, projde znovu a následně je přijímačem detekován.

Vlhkost materiálu se modeluje pomocí kvadratického modelu dle následujících rovnic.

$$w_m = K_0 + K_1 X + K_2 X^2 \quad (3.3)$$

$$X = (\Delta A - A_0) / (\Delta \Phi - \Phi_0) \quad (3.4)$$

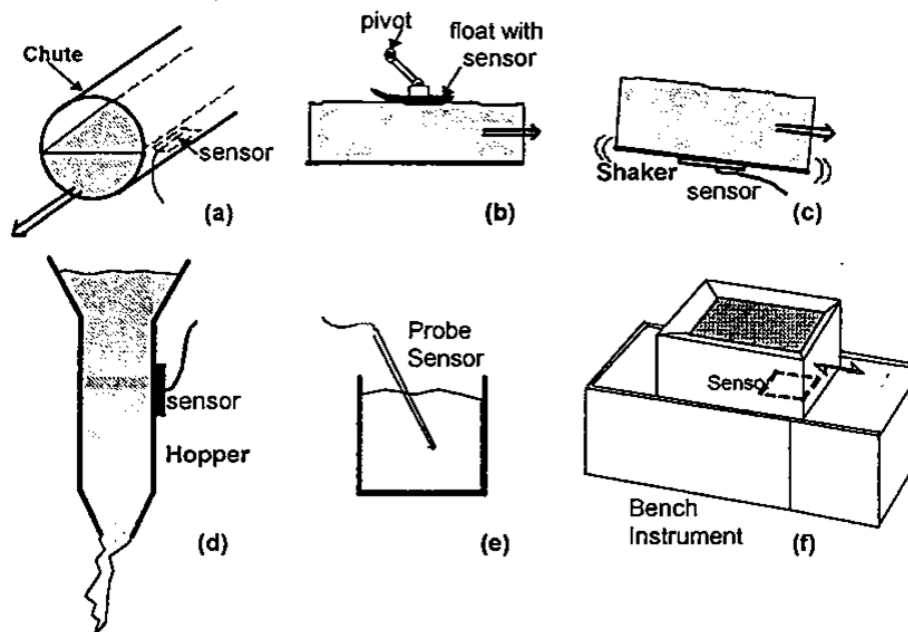
kde K_i jsou kalibrační konstanty, ΔA energetická ztráta signálu a $\Delta \Phi$ fázový posun signálu. A_0 a Φ_0 jsou též kalibrační konstanty, jejichž vhodnou volbou lze dosáhnout robustního modelu nezávislého na hustotě a tloušťce měřeného materiálu.

3.1.2.3.2 Kontaktní

Kontaktní metoda využívá kontaktní senzory s otevřeným rezonátorem, které jsou konfigurovány tak, aby elektromagnetické pole pronikalo skrz materiál. Naměřená hodnota rezonanční frekvence a f_r a vstupního odporu R_0 tohoto setupu je nepřímo úměrná relativní permitivitě (ϵ') a ztrátovému faktoru (ϵ''). Vlhkost w_m je modelována též dle kvadratického modelu jako v rovnici (3.3). V tomto případě je ale výpočet kvadratického členu vypočten:

$$X = (\epsilon'' - \epsilon_0'') / (\epsilon' - \epsilon_0')$$

kde ϵ'_0 a ϵ''_0 jsou kalibrační konstanty, které se volí tak, aby model nebyl závislý na hustotě měřeného materiálu.



Obrázek 3.5: Typické aplikace mikrovlnných rezonančních senzorů vlhkosti

3.1.3 Spektroskopické metody

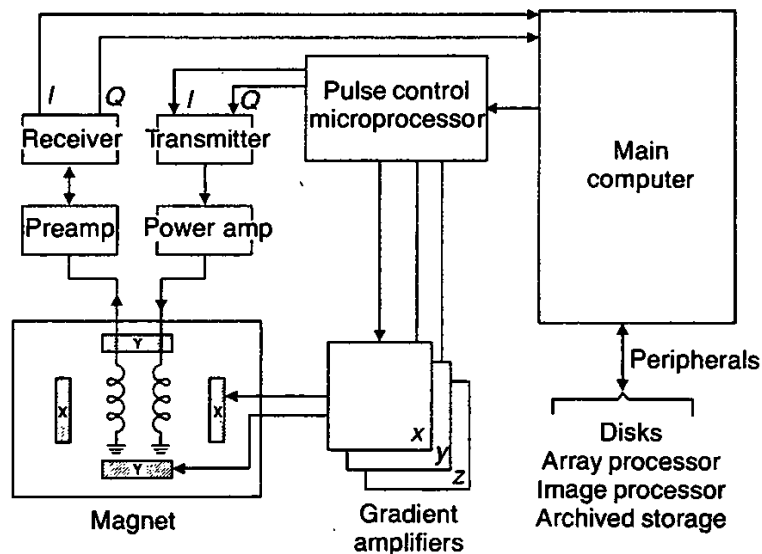
Principem měření je analýza absorpce energie záření v různých energetických spektrech (UV, viditelné, IR, NIR nebo nukleární magnetická rezonance (NMR)). Molekuly vody absorbují energii záření různými způsoby – od excitace přes vibraci a rotaci OH vazby až po protonovou magnetickou rezonanci.

Jedná se převážně o metody, které obecně vyžadují veliké počáteční investice do přístrojů a odbornosti obsluhy. Spektroskopické metody dokáží měřit vlhkost nedestruktivně, dokonce i spojitě, tzv. online. Na rozdíl od ostatních metod poskytuje pokročilá spektroskopie informace o materiálu na molekulární úrovni.

Při použití UV a viditelného světla je potřeba materiál obarvit, např. dichromanem draselným nebo chloridem kobaltnatým pro zachycení daného spektra. Kvůli kontaminaci barvivem nejsou tyto metody příliš atraktivní. IR, NIR a NMR barvení nevyžadují.

3.1.3.1 Nukleární magnetická rezonance (NMR)

Dle kapitoly g) je vlhkost vázána v jílu až 5 různými způsoby, přičemž každá forma vlhkosti má různou kinetickou energii molekul a energii vazby. NMR umožňuje rozlišit jednotlivé formy vlhkosti a tím prohloubit znalost struktury vlhkosti. Nevýhodou této metody jsou velmi vysoké náklady a komplexnost.



Obrázek 3.6: Schéma zapojení měřicího obvodu NMR (Wang 2000)

Každý atom vodíku má proton s dvěma možnými orientacemi magnetického momentu díky spinovému číslu $\frac{1}{2}$. Energie potřebná k přechodu z jednoho stavu do druhého leží v pásmu rádiových frekvencí (řádově stovky MHz). Pokud vystavíme měřený vzorek s obsahem vlhkosti takovému záření, protony se excitují do orientace s vyšší energií. Počet excitovaných částic je přímo úměrný obsahu vlhkosti.

Excitované protony mají tendenci přejít zpět do nižšího energetického stavu. Při přechodu uvolňují energii v zásadě dvěma různými způsoby. V nevázané volné vodě mají molekuly vysokou kinetickou energii a sráží se s ostatními molekulami a předají energii ve formě tepla v čase T_1 (doba spin-mřížkové relaxace). V případě molekul s omezeným množstvím molekulárních stupňů volnosti molekuly jsou méně dynamické, ale vyznačují se silnou vazbou s dipóly sousedních molekul. V čase T_2 molekula přejde zpět z excitovaného do základního stavu předáním energie spin-spinovými interakcemi – tzv. spin-spinová relaxace. (Wang 2000; Holčapek 2022)

Hodnota T_2 vypovídá o fyzickém stavu molekul vody v materiálu. Existují dvě metody měření T_2 : měření spin-echových pulzů a měření šířky NMR.

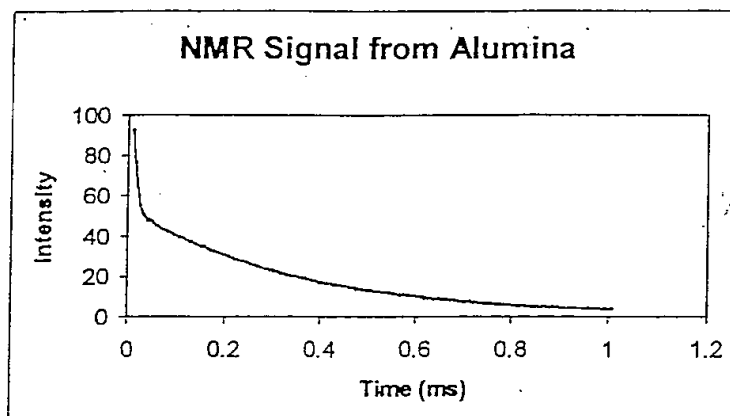
a) Sekvence spin-echových pulzů

T_2 se dá spočítat pomocí snímání intenzity spinových ech:

$$I = I_0 \cdot \exp(-t/T_2) \quad (3.5)$$

kde I a I_0 jsou intenzity signálu snímaných spinových ech v čase t a v rovnováze. Ukázka snímané intenzity je znázorněna na Grafu Graf 3.1. Oblast strmého poklesu

indikuje vodu vázanou s nízkým časem relaxace T_2 a pozvolný pokles naopak vodu volnou s vyšším časem T_2 .



Graf 3.1: Měřený pokles intenzity spinového echa vlhkosti korundu (Wang 2000)

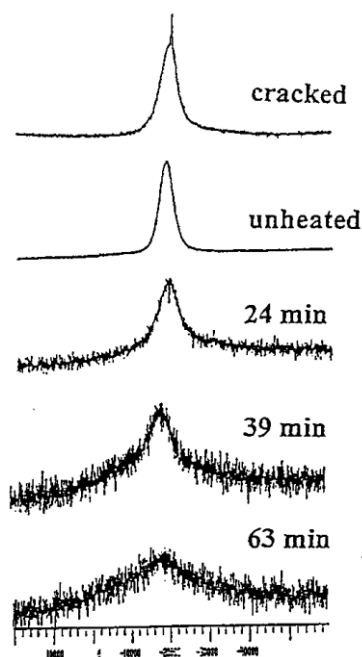
b) Šířka NMR

Výstupní signál NMR z měření pevného vzorku reprezentuje silnou interakci dipólů částic s nízkou hodnotou T_2 a jeho charakter je široký. Tedy šířka NMR je nepřímo úměrná času T_2 .

$$T_2 \sim (\Delta H_{1/2})^{-1} \quad (3.6)$$

kde $\Delta H_{1/2}$ je šířka rezonančního píku v polovině intenzity.

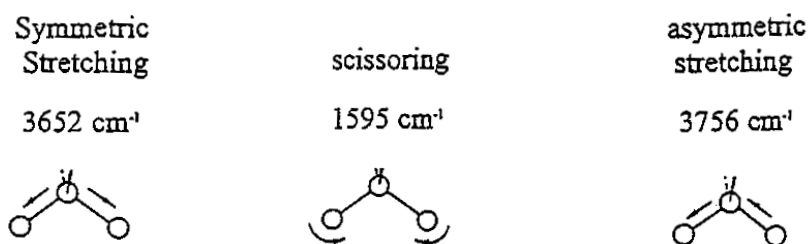
Na obrázku Obrázek 3.7 lze pozorovat výsledné rezonanční křivky měření NMR. První dvě křivky znázorňují užší charaktery molekul volných s vysokými časy T_2 a nízkými časy T_1 . Ohříváním se volná voda ztrácí a křivka se rozšiřuje do charakteristické podoby pro vodu vázanou.



Obrázek 3.7: Výsledek měření NMR, vzorky zahřáté na 105 °C

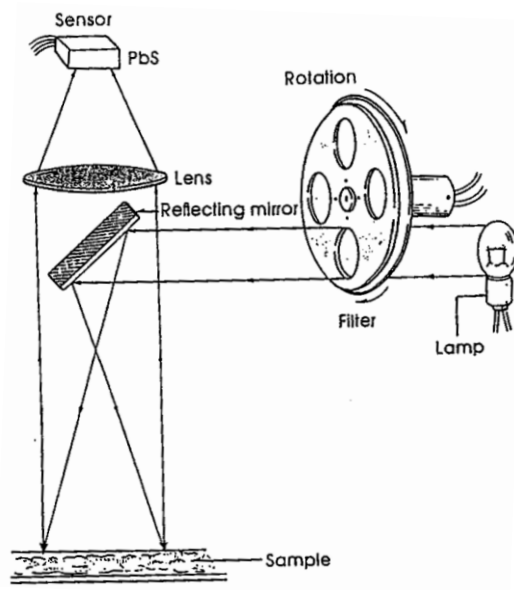
3.1.3.2 NIR (Near Infra-Red)

Molekula vody má 3 atomy a tedy 9 molekulárních stupňů volnosti. Po odečtení základních rotací a translací zbývají tři stupně, které lze přiřadit k základním molekulovým vibracím. Každý ze tří vibračních momentů má svoji charakteristickou energii a symetrii. Nazývají se „symetrické natahování“, „střih“ a „nesymetrické natahování.“ Frekvence vibrací molekul je závislá na atomové hmotnosti jednotlivých atomů.



Obrázek 3.8: Zobrazení vibračních módů molekuly vody (Wang 2000)

Když světelný paprsek projde materiálem, část záření o energii charakteristické pro tyto vibrace je pohlcena. Úbytek energie při těchto charakteristických frekvencích může být použit ke kvantifikaci vlhkosti v materiálu. Obrázek Obrázek 3.9: Schéma měření pomocí IR (nebo NIR) spektrometru zobrazuje zjednodušené schéma spektrometru fungujícího na tomto principu snímající odražené záření.

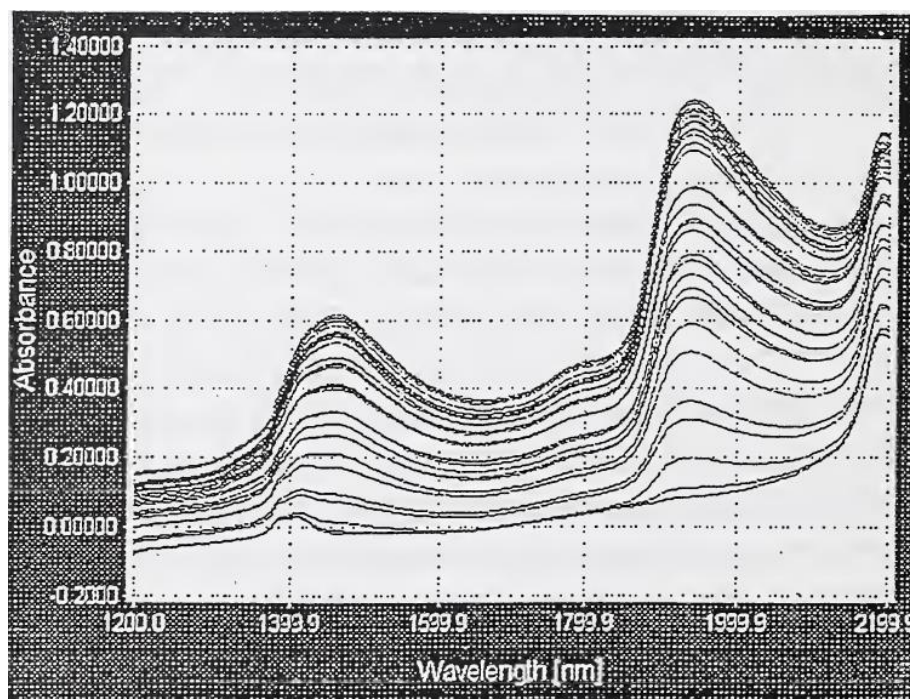


Obrázek 3.9: Schéma měření pomocí IR (nebo NIR) spektrometru (Wang 2000)

Výhodou této metody je její přesnost, poměrně nízká cena a flexibilita. NIR senzory jsou přenosné a mohou operovat i on-line. Existuje také vysoký potenciál filtrace a analýzy signálu pro získání veškerých obsažených informací. Nevýhodou této metody je fakt, že se jedná o povrchovou metodu. IR senzory jsou schopny detekovat absorpci záření pouze na povrchu (hloubka kolem 1 mm). NIR i IR senzory jsou navíc citlivé na barvu vzorku.

Dalšími problémy této metody jsou narušení charakteristických frekvencí vibračních módů chemickými či fyzikálními vlivy prostředí nebo nasycení detektoru kvůli silné absorpci při měření neprůhledných vzorků. Řešením těchto problémů je měření vyšších harmonických frekvencí. Tyto frekvence již většinou spadají do pásma NIR. Výhodou NIR je větší prostupnost záření skrz materiál (v řádech milimetrů).

Graf 3.2 znázorňuje příklad měření pomocí analýzy spektra NIR. Jednotlivé křivky znázorňují měření v různých časech. Důležitým výsledkem je postupné mizení extrémů kolem 1940 nm a 1460 nm (vyšší harmonické vibračních módů) a postupné relativní zesílení píku kolem 1400 nm. Tento pík se vyskytuje v měření i suchých vzorků. Jedná se o zachycení posunutého pásma absorpce vázaných molekul vody nebo absorpce samotným materiálem (např. $\text{Al}(\text{OH})_3$).

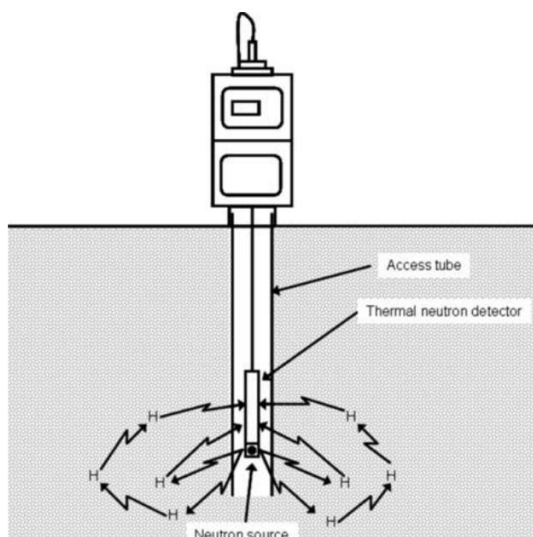


Graf 3.2: Ukázka výsledku měření absorpce jednotlivých vlnových délek NIR záření (Wang 2000)

3.1.4 Neutronová sonda

Měření vlhkosti pomocí neutronové sondy funguje na principu měření rozsahu termalizace rozptýleného mraku neutronů. Měření je prováděno pomocí rychlé neutronové sondy vysílající neutrony o vysoké energii v kombinaci s pomalejším detektorem termálních neutronů. Vysílané neutrony se postupně zpomalují srážkami s částicemi materiálu až do bodu, kdy mohou být zachyceny detektorem. Se zvyšující vlhkostí materiálu je vytvořený neutronový oblak menší a hustší, neboť částice koludují s vlhkostí mnohem dříve. Detektor zaznamenává větší množství dopadajících částic.

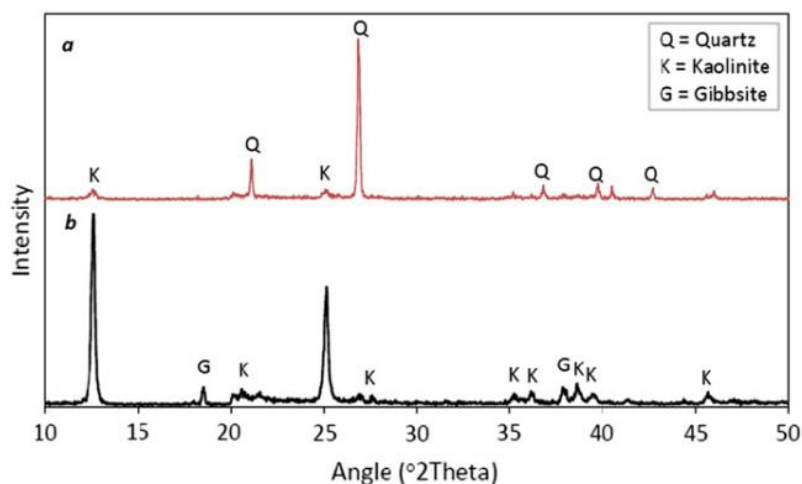
Měření pomocí neutronové sondy je poměrně univerzální a velice přesná metoda. Jednotlivé měření velkého objemu materiálu trvá 1-2 min. Neutronová sonda má potenciál určit celkový podíl vlhkosti stejně dobře jak v popraskaných, tak v nepopraskaných zeminách. Fityus et al. (2011) popisuje experiment měření vlhkosti zeminy pomocí neutronové sondy v závislosti na výskytu trhlin u expanzních jílu. Oproti ostatním metodám prokázala neutronová sonda lepší robustnost. Ovšem, tento experiment zároveň poukazuje na určité limitace. Jelikož neutronová sonda je zdrojem vysokoenergetických neutronů, je potřeba dodržovat pravidla, regulovat použití a podstoupit školení bezpečnosti práce s radioaktivním zařízením. Další její nevýhodou je vysoká pořizovací cena a obtížná manipulace mezi pracovišti. (Susha Lekshmi et al. 2014)



Obrázek 3.10: Schéma neutronové sondy (Fityus et al. 2011)

3.2 Analýza složení

Orientační mineralogicko-petrografický popis zbytků na sítech je popsán v normě ČSN 72 1565-3. Samotný síťový rozbor zrnitosti je popsán v kapitole 3.7. Zbytky na sítech jsou poté kvalitativně zkoumány. Při analýze je zkoumán vzhled minerálů a hornin, probíhá identifikace škodlivin. Zbytky se rozdělí do třech skupin dle velikosti: menší než 2,0 mm, od 2,0 mm do 8,0 mm a větší než 8,0 mm. Pomocí mikroskopu nebo lupy je nutné pozorovat a popsat zbytky a zaměřit se zvláště na cicvár, křemen, pyrit, sádrovec, organické látky, slídu apod. Vedle optické inspekce lze také použít zkoušky tvrdosti, žíhání nebo chemické reakce.



Graf 3.3: Ukázka rentgenového spektra mineralogického měření 2 vzorků (Andrews et al. 2013)

Chemické složení odebíraných vzorků jílu je možno určit pomocí různých metod. (Andrews et al. 2013) využil pro zkoumání složení jemně drcených vzorků metodu rentgenové fluorescenční spektroskopie (XRF-Spectro X-LAB 2000).

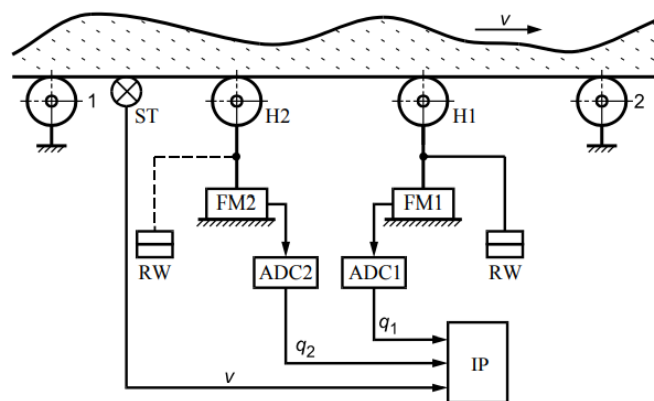
3.3 Měření hmotnosti a hmotnostního toku

Měření hmotnostního toku materiálu ve výrobním procesu je nutné zejména v případě mísení složek směsí, které jsou definovány hmotnostními poměry. Měření

3.3.1 Kontinuální dopravníkové měření hmotnostního toku

Kontinuální dopravníkové měření hmotnosti spočívá v měření tlaku, kterým působí materiál přítomný na pásu na nosnou konstrukci. Vstupní tok transportovaného materiálu je charakterizován několika základními parametry, mezi které patří hustota materiálu, rychlost pásu, granulometrická kompozice apod. Dopravníkový pás, který přenáší danou tíhu na konstrukci, potažmo na měřicí senzory, má také své dynamické vlastnosti, které se různě mění dle módu provozu, např. moment setrvačnosti, tuhost nebo modul pružnosti.

Všechny výše zmíněné parametry ovlivňují naměřená data. Pro úspěšné měření hmotnostního toku je nutné vytvořit vhodný kalibrační model, který umožní naměřená data filtrovat a potlačit vliv nežádoucích dynamických nebo tepelných účinků. Galin a Donis (2014) uvádí příklad kalibrace dopravníkové váhy pomocí referenčních vah bez nutnosti zastavení technologie.



Obrázek 3.11: Dvoukanálová dopravníková váha (Galín a Donis 2014)

3.4 Měření hustoty

a) Materiálová hustota (měrná hmotnost)

Hustota kompaktního materiálu se dá jednoduše změřit pomocí pyknometrické metody. Ta je popsána normou ČSN EN 1097-7:2008 jako způsob stanovení objemů vzorků nepravidelného tvaru. Podstata zkoušky spočívá v nahrazení části objemu kapaliny o známé měrné hmotnosti objemem měřeného vzorku. Pokud je známá hmotnost vzorku, poté se může vypočítat i měrná hmotnost.

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}}$$

kde m_0 je hmotnost prázdného pyknometru, m_1 je hmotnost pyknometru s testovaným vzorkem uvnitř, m_2 je hmotnost pyknometru se vzorkem dolitého destilovanou vodou. ρ_l je hustota kapaliny při 25 °C.

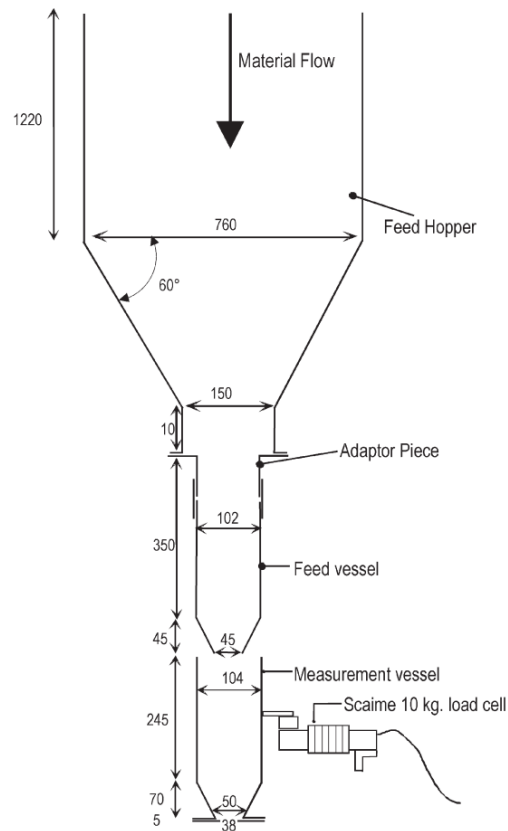
Pyknometrickou metodu popisují také např. americké standardy. Andrews et al. (Andrews et al. 2013) využil standard ASTM D854-93 pro změření měrných hmotností jílových vzorků, které jsou založené též na pyknometrické metodě.

b) Objemová (sypná) hustota

Objemovou (sypnou) hustotu (definováno v kapitole 1.2.4) lze měřit přímo a se značnou přesností pomocí přístroje, který se skládá ze svisle umístěné nádoby připojené k siloměru. Zkoušený materiál proudí seshora a odchází otvorem, který přiškrcuje průtok a udržuje nádobu stále plnou; objemová hustota se získá ze známého aktivního objemu nádoby a hmotnosti materiálu v ní měřené siloměrem. Kromě definování a udržování konstantního objemu produktu pro nepřetržité měření hustoty, udržuje snímací nádoba účinně rovnoměrný průtok práškové hmoty, a je tak ideálním místem pro měření jejích vlastností.

Takto popsané měření je dle použitého materiálu různě náročně na odladění, proto se přímé měření hustoty v reálném čase používá omezeně. Alternativními způsoby měření jsou měření nepřímá, např. měření tlumení γ -záření apod. Mnoho dostupných metod spočívá ve využití radioaktivních emitorů, které jsou rizikové a velice drahé a pro mnoho aplikací i nevhodné.

Objemová hustota vykazuje vysokou korelaci s velikostí zrna. Postačující alternativou radioaktivních metod měření objemové hustoty je měření velikosti průměrného zrna. (Davies et al. 2005)



Obrázek 3.12: Schéma experimentálního setupu pro měření objemové hustoty materiálu (Davies et al. 2005)

3.5 Měření žárovzdornosti

Dle ČSN 72 6020 je žárovzdornost měřena pomocí žároměrné shody. Ze vzorku měřeného materiálu se vytvoří tzv. žároměrky, což jsou zkušební tělíska ve tvaru trojbokých šikmých jehlanů. Žároměrky se umístí do pece stanoveným způsobem spolu s referenčními žároměrkami z materiálů o známé žárovzdornosti. Teplota v peci se postupně zvyšuje až je dosaženo žároměrné shody. Ta nastane, když se zkoušený materiál zdeformuje stejným způsobem jako jiná referenční měrka.



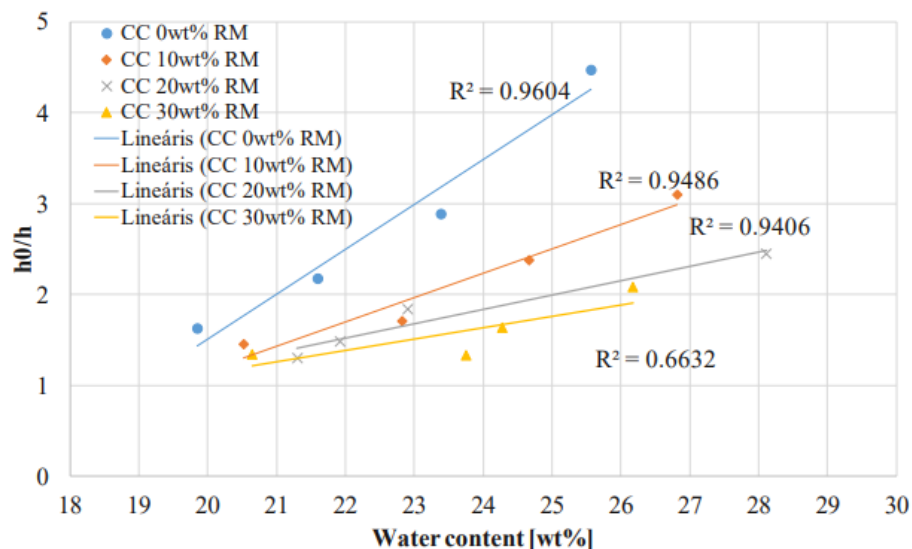
Obrázek 3.13: Keramické žároměrky ([zdroj](#))

3.6 Měření plasticity

Základními metodami určení plasticity jsou Pfefferkornova, Attenbergova nebo zkouška průniku kužele (indentorová). Přesnější a časově náročnější metodou je kapilární reometre (Hamza et al. 2019).

3.6.1 Pfefferkornova metoda

Pfefferkornova analýza je základním materiálovým testem plasticity. Tato metoda určuje množství vody potřebné k dosažení 30 % deformaci ve vztahu k počáteční výšce zkušebního tělesa při působení předepsaného zatížení. Výsledky jsou obvykle vyjádřeny jako grafy znázorňující snížení výšky v závislosti na obsahu vlhkosti. Pfefferkornova analýza je často nesouvislá a nepřesná, což vede k chybné analýze mechanických vlastností suchých keramických výrobků, jakož i charakteristik sušení apod.

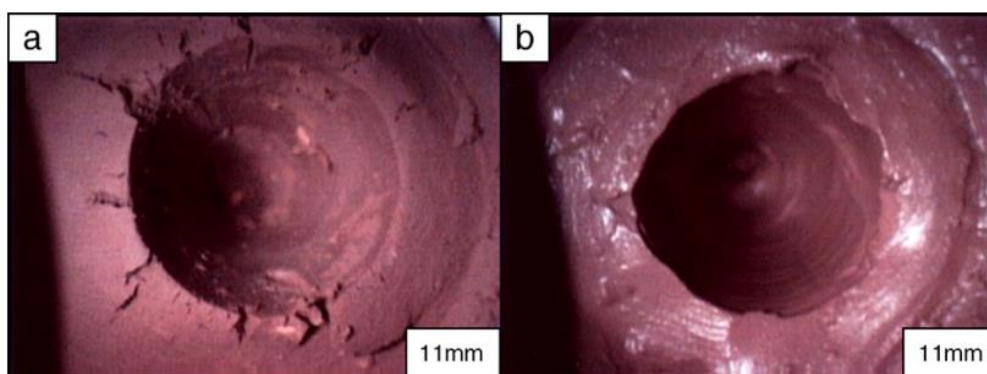


Graf 3.4: Pfefferkornova křivka plasticity (Hamza et al. 2019)

3.6.2 Indentační metoda

Zkušební postup je založen na působení vlačovací síly na vzorek hlíny, plasticita je přímo dána vlačovací silou měřenou na digitálním displeji, podobně jako u zkoušek tvrdosti. Mezi hlavní příslušenství patří digitální displej pro odečítání posunutí, vyměnitelné válce obsahující vnitřní pružinu (50 N/cm) pro stanovení reakční síly, kontrolní pružina, která zaručuje konstantní a postupné působení vtiskovací síly na vzorek, a válcový kužel se základnou 30 mm a úhlem 30°.

Vzorky pro tuto zkoušku byly namlety, vysušeny a prosety. Takto připravený prášek byl smíchán s daným množstvím vlhkosti a vzniklá pasta byla homogenizována. Tato procedura zajistila opakovatelnost výsledku. Regulace vlhkosti vzorku je velice důležitá. Na obrázku Obrázek 3.14 lze pozorovat nevyváženost vlhkosti ve zkušebních vzorcích. (de Oliveira Modesto a Bernardin 2008)



Obrázek 3.14: a) Příliš suchý vzorek b) Příliš vlhký vzorek (de Oliveira Modesto a Bernardin 2008)

3.7 Měření granulometrie a velikosti zrna

Měření granulometrického složení je převážně normované, dávkové a provádí se laboratorně. Jeho účelem je mapovat kvality dodávaného materiálu pro splnění normy výrobní receptury. Běžně se používá síťový rozbor a pro jemnější zrnitosti hustoměrná zkouška. Modernější metody využívají optické a spektrometrické metody. V určitých případech je nutné také měřit průběžně, zejména průměrnou nebo maximální velikost zrna.

3.7.1 Síťový rozbor

Síťový rozbor cihlářských zemin je popsán v normě ČSN 72 1565-3. Jedná se o metodu určenou pro rozlišení frakcí o zrnitosti větší než 0,063 mm. Podstatou zkoušky je proplavení určitého množství materiálu sítím o délce strany oka 0,063 mm a prosátí zbytku na tomto sítě sadou normových sít. Jedná se o sadu kontrolních sít o předepsané odstupňované velikosti čtvercových ok, která jsou seřazena od nejhustších po nejřidší. Zbytky na jednotlivých sítích se vyjadřují v procentech hmotnosti původní zeminy.

Prvním krokem zkoušky je vysušení vzorku buď při 110 °C a pokud to není možné, tak při 60 °C a zbytková vlhkost bude odečtena po jejím naměření. Vysušený materiál se podrtí na zrna o velikosti menší než 15 mm. Naváží se s přesností 0,1 g a smíchá se v kádince s vodou na suspenzi. Rozpojený vzorek se přeje přes síto 0,063 mm a prolévá se vodou, dokud neprochází sítím čirá. Zbytek na tomto sítě se opět vysuší vhodným postupem a proseje přes sadu normovaných sít (buď ručně nebo strojově). Prosévání se považuje za ukončené tehdy, když při kontrolním ručním protřásání síta nepropadne za 60 s více než 0,1% hmotnosti celé navážky.

Přesným vážením zbytků na sítích v poměru s celkovou hmotností suché navážky získáme procentuální zastoupení jednotlivých zrnitostních podílů, tzv. frakcí, ve vzorku.



Obrázek 3.15: Analytický síťovací přístroj AS 200 firmy Retsch

3.7.2 Sedimentační zkouška (hustoměrná)

ČSN 72 1565-2 popisuje metodu určení zrnitosti pomocí sedimentace. Tato metoda je určena pro zeminy s jemnější zrnitostí než síťový rozbor. Podstatou zkoušky je kvadratická závislost rychlosti sedimentace na velikosti částic.

Vzorky zeminy vysušené na vzduchu se lehce podrtí na velikost zrna menší než 2 mm. Stanoví se poměrná vlhkost vzorku a hmotnost s přesností 0,002 g. Vzorek je vpraven do destilované vody a mixován. Takto připravený vzorek se ve válci promísí a nechá se volně sedimentovat za soustavného měření času a teploty. V daných časových intervalech se odebírají vzorky pomocí pipety pro výpočet koncentrace zrn suspenze v dané hloubce.

Odebrané vzorky se nechají vysušit a zchladnout v exsikátoru, a poté přesně navážit. Tím se určí podíl jednotlivých frakcí. Těmi v případě sedimentační zkoušky jsou menší než 2 μm , 2 μm až 20 μm a větší než 20 μm . Jednotlivé podíly frakcí se potom vypočítají a mohou být znázorněny pomocí trojúhelníkového diagramu na obrázku Obrázek 1.4, který lze použít pro analýzu užitečných oblastí zrnitostního složení zemin

3.7.3 Optický a laserový rozbor

Optické a laserové metody analýzy granulometrie jsou převážně nedestruktivní metody. Jejich výhodou je možnost analýzy dalších informací o částicích zemin. Vedle samotné velikosti např. tvar částic nebo jejich prostorové struktury. Tan et al. (2014) prezentuje laboratorní studii, která se zabývá pozorováním velikosti molekul a krystalických struktur jílu při různých simulovaných podmínkách prostředí. Šebor

(1983) uvádí mikroskopického pozorování jako alternativu síťového rozboru pro jemnozrné jíly.

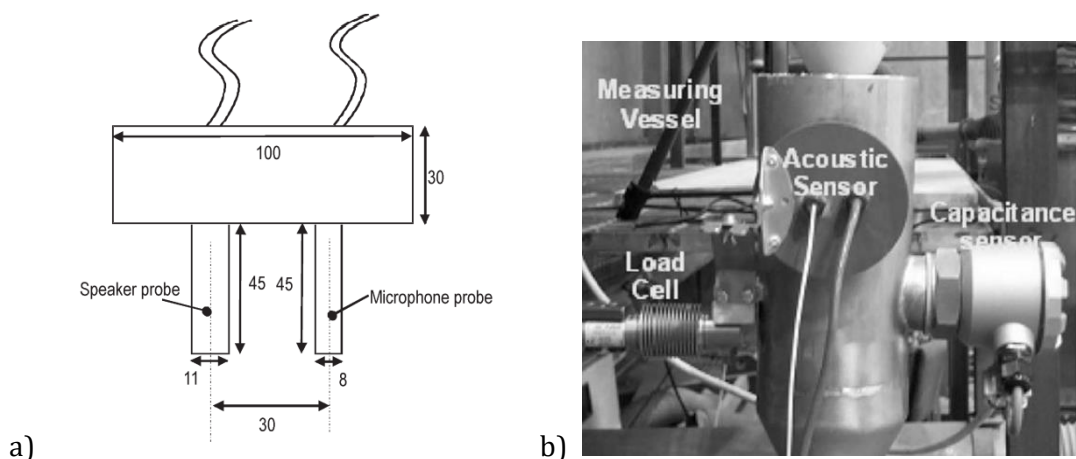
První zmíněný výzkum využíval přístroj *Cilas® 1190 particle size analyzer*. Tento přístroj funguje na principu kombinace laserové difrakce a Fourierovy transformace obrazu CCD kamery. Díky tomu přístroj detekuje částice v rozsahu 0.04 až 2 500 μm . Měření je realizováno pro mokré nebo suché vzorky. Při mokřém módu měření jsou vzorky rozptýleny ve vodě, promíchávány a rozměňovány ultrazvukovým vlněním. Při suchém módu jsou vzorky vysušeny a umístěny do vibrační mísy, kde jsou zjemňovány. Výstupní data analýzy granulometrie vzorků v tomto experimentu byla interpretována pomocí modelu ekvivalentních koulí.



Obrázek 3.16: Laserový částicový analyzátor Cilas® 1190

3.7.4 Akustické měření

Davies et al. (2005) popisuje akustickou metodu měření průměrné velikosti zrna v hustém toku jemného sypkého materiálu. Jedná se o měření kontinuální. Akustický měřicí systém (viz Obrázek 3.17a) vysílá pulzující signál prostřednictvím reproduktoru přímo v materiálu. Vysílaný signál projde skrz materiál a je zachycen mikrofonom senzoru v dané délce od zdroje. Rychlost zvuku procházejícího skrz materiál je vysoce korelována s průměrnou velikostí zrna materiálu. Přesnost měření dosahuje řádu 1 %. Jedná se o nenáročnou metodu s jednoduchou instalací. (Davies et al. 2005)

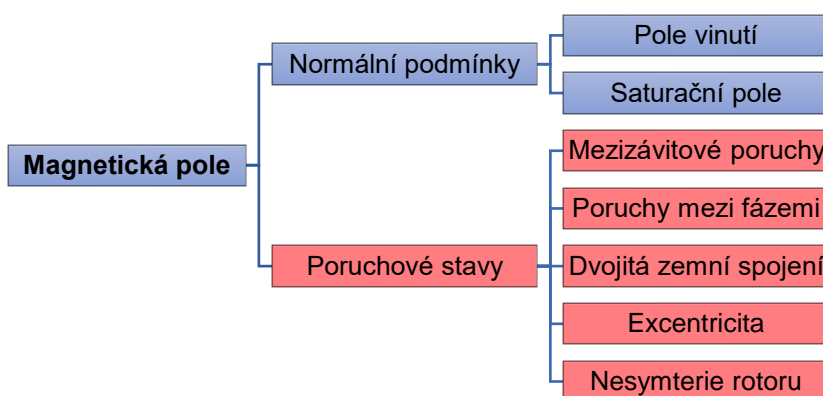


Obrázek 3.17: (a) Schéma akustického senzoru zrnitosti (b) Fotografie instalace senzorů (Davies et al. 2005)

3.8 Detekce poruch elektrických pohonů

Zpracovatelské technologie pro úpravu jílových materiálů zahrnují užití množství točivých elektrických pohonů. Ačkoli díky technologickému pokroku jsou elektrické stroje poměrně spolehlivé, nelze jejich poruchy zcela vyloučit. Pro zajištění plynulého chodu výroby a snížení poruchovosti strojů je nutné stanovit odpovídající řád údržby. Jedná se o údržbu preventivní. Díky systémům pro detekci a diagnostiku poruch lze nastavit úspornější údržbu díky online monitorování stavu stroje a systémům prediktivní údržby. Ty vychází z datových modelů strojů, které jsou trénovány pomocí reálných poruchových situací.

Norma ČSN CLC/TS 60034-24 popisuje detekční metody, které je možné využít k rozlišení různých poruch aktivních částí vícefázových točivých strojů a ložiskových proudů. Princip funkce elektrických motorů spočívá v existenci magnetického pole v mezeře mezi statorem a rotorem, které tvoří smyčku napříč vinutími. Metody detekce poruch elektrického pohonu spočívají v analýze tohoto magnetického pole a v rozlišení mezi jeho provozní a poruchovou podobou.



Obrázek 3.18: Rozdělení důležitých magnetických polí ve vzduchové mezeře

3.8.1 Analýza statorových proudů a napětí

Analýza napětí a proudu na svorkách umožňuje monitorovat rozdílné kmitočty, sousledné, zpětné a nulové složky nebo různé amplitudy složek. Veškeré indukční vlny v magnetickém poli obecně indukují napětí a proudy ve statoru. Poruchové proudy a napětí se superponují na ty provozní.

3.8.2 Magnetické toky ve vzduchové mezeře

Tyto magnetické toky jsou detekovány pomocí indukovaných napětí pomocných závitů uložených ve statorových drážkách nebo pomocí jiných magnetických senzorů pro měření magnetického toku. Za běžného stavu by tento diagnostický magnetický tok měl mít nulovou hodnotu a v případě poruchových vad je nenulový.

3.8.3 Axiální toky

Axiální toky jsou také měřené jako indukovaná napětí na měřicích cívkách, a to buď na toroidních cívkách na přední straně stroje nebo na cívce obklopující hřídel. Axiální toky jsou obecně nežádoucí, neboť výkon stroje je založen na příčných složkách toku. Jejich detekce rozhodně vypovídá o nežádoucích stavech. Nicméně, axiální toky jsou nepředvídatelné pomocí analytických metod, velmi slabé z důvodu velkého odporu vzduchu a obecně těžko detekovatelné.

3.8.4 Hřídelové napětí

Hřídelová napětí jsou způsobena oběžným tokem, který se uzavírá okolo hřídele. Tento tok je způsoben nepravidelnostmi kolem hřídele a je vybuzen pouze tehdy, když se integrál intenzity pole okolo obvodu hřídele odchyluje od nuly. Nicméně hřídelové napětí může být rušeno několika zdroji a je těžko využitelné pro detekci poruch aktivních částí stroje.

3.8.5 Ložiskové proudy

Ložiskové proudy mají zásadní dva zdroje, a to nepravidelné jho statoru nebo souhlasné proudy u motorů napájených z měničů.

Nepravidelnostmi jha rozumíme např. ventilace, spojky, zářezy apod. Dle jejich počtu a rozložení podél obvodu vznikají hřídelová napětí vedoucí k proudům protékajícím oběma ložisky. Proudům obvykle obsahují základní i superponované kmitočty. Pokud napětí přesahuje 200 až 250 mV, mohou být ložiska ohrožena a měla by být od hřídele izolována.

Podobně tomu je u souhlasných proudů u motorů napájených měniči, které vytváří přídatný zdroj ložiskových proudů. Opatření pro ochranu proti těmto proudům volí

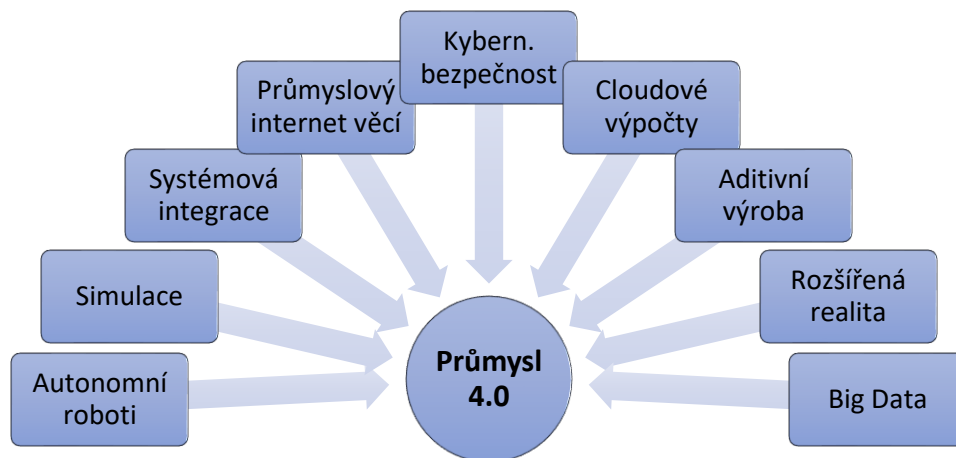
konstruktér v závislosti na uspořádání stroje. Pro diagnostické měření lze sledovat průrazy izolace ložisek, případně olejového filmu ložisek pomocí analýzy napětí hřídele proti zemi snímacími kartáči.

4 Systémové řízení a automatizace

Již od doby první průmyslové revoluce probíhá postupná evoluce automatizace výroby, která přináší nové technologie, výrobní koncepty nebo změny v podnikovém řízení. S příchodem těchto změn je potřeba nalézt způsob, jak je integrovat do již dobře fungujících stávajících systémů. Potřeba integrace vzrostla z modernizace a nahrazování jednotlivých komponent na úroveň podnikového managementu. V dnešní době již čelíme tzv. 4. průmyslové revoluci. (Bangemann et al. 2016)

4.1 Průmysl 4.0

Koncept Průmyslu 4.0 (P4.0) vznikl během hospodářské krize v letech 2008 až 2011 jako způsob udržení kompetitivnosti německého post-krizového průmyslu. Oficiálně byl představen v roce 2011 na veletrhu v Hannoveru. Průmysl 4.0 se stal široce přijímaným konceptem. Spočívá v rychlých změnách v oblasti designu, výroby, provozu, logistiky a služeb, což má velmi významný dopad na všechny dimenze společnosti. (Machado a Davim 2020)



Obrázek 4.1: Základní pilíře Průmyslu 4.0 (Vaidya et al. 2018)

4.1.1 Základní technologie

Průmysl 4.0 (P4.0) vzájemně propojuje technologie a organizaci výroby. Základním rozdílem mezi P4.0 a CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) je role člověka. Zatímco CIM směřuje k výrobě bez lidského faktoru, P4.0 vyzdvihuje důležitost člověka v prostředí výroby. Průmysl 4.0 je spojen s klíčovým výzkumem v následujících oblastech. Tyto základní technologie se souhrnně vytyčují pomocí diagramu základních pilířů Průmyslu 4.0 (Obrázek 4.1). (Vaidya et al. 2018)

4.1.1.1 Informační a komunikační technologie (ICT)

Základními technologiemi umožňujícími spustit celý proces průmyslové přeměny v duchu P4.0 jsou informační a komunikační technologie (ICT). Podniková komunikace probíhá mezi stroji (M2M) nebo do ní může vstupovat operátor, zákazník, jakékoli senzory a další účastníci. Média komunikace se různí – jednotné podnikové sběrnice s danou sémantikou, internet věcí (IoT) apod. Internetem věcí rozumíme síť adresovaných uniformních objektů, které komunikují přes standardní protokol.

Výroba je dle základních principů orientována na služby, proto P4.0 přináší také internet služeb (IoS), pomocí kterého mohou být zprostředkovány také služby. Celkově je kladen důraz na vytvoření otevřené chytré výrobní platformy přístupné odkudkoli.

V rámci podnikové strategie probíhá sběr, zpracování a analýza velkých dat z trhu. Důležité je pro podnik totiž získání zpětné vazby trhu na používání produktu a jeho další přizpůsobení. Součástí produktů se stávají cloudové služby, IoT nebo servisní systémy.

4.1.1.2 Systémová integrace

Integrace systémů je dle paradigmatu P4.0 nastíněna ve třech základních rozměrech, a to (a) horizontálně v síti tvorby hodnoty, (b) vertikálně přes síť výrobních strojů, (c) integrace v celkovém životním cyklu. Plná digitální integrace a automatizace ve vertikálním a horizontálním směru znamená též automatizaci komunikace a kooperace.

Standardem výrobních procesů je digitální automatizace – řízení pomocí programovatelných regulátorů (PLC) – buď bez senzorů nebo se senzory pro monitorování procesu. V chytrých podnicích (*Smart factories*) se objevují tzv. kyberneticko-fyzikální systémy (CPS), které integrují jednotlivé stroje nebo výrobní jednotky. CPS monitorují fyzikální procesy, simulují jejich virtuální dvojčata a umožňují autonomní decentralizované řízení procesu. CPS používají ICT pro komunikaci mezi sebou, operátory a dalšími účastníky v reálném čase. Tzv. flexibilní linky obsahují i senzory pro identifikaci produktu a operativní změnu programu nebo výrobních podmínek.

4.1.1.3 Big data a cloud computing

V podniku i v dodavatelském řetězci dochází ke sběru velkého množství dat a jejich ukládání a analýze. Data jsou používána k prediktivní údržbě, strojovému učení a optimalizaci nebo přizpůsobení podmínek výroby vzhledem ke znalosti jednotlivých kusů. Data z výroby jsou také důležitým zdrojem pro identifikaci hrozeb a predikci potenciálních rizik při operativním rozhodování. Proces výroby je v reálném čase monitorován systémy jako MES (*Manufacturing Execution Systems*) a SCADA (*Supervisory control and Data Acquisition*).

Veškerá nasbíraná data v CPS jsou zpracována buď lokálně nebo použitím *cloud computing*. P4.0 vyžaduje zvýšené sdílení dat napříč pracovišti a společnostmi, tj. dosažení reakčních časů v milisekundách nebo ještě rychlejších. "Digitální výroba" je koncept, který spočívá v tom, že různá zařízení jsou připojena ke stejnému cloudu, aby si navzájem sdílela informace, a lze je rozšířit na soubor strojů z dílny i celého závodu.

4.1.1.4 Aditivní technologie

Výroba je účelně doplněna aditivními technologiemi. Aditivní technologie představují metodu rapidního prototypování, ale zároveň výrobní kapacitu malých dávek vysoce individualizovaných výrobků s různými výhodami, např. ultralehké, optimalizované, komplexní, bez čekání na dodávku nebo nutnosti naskladňování.

Další možnost validace má podobu rapidního prototypování. Díky rozsáhlým možnostem technologie 3D tisku je možné prototypovat velmi flexibilně.

4.1.1.5 Autonomní roboti

Vzrůstající úroveň autonomie výroby je podpořena také autonomními roboty. Jejich implementace v chytrém podniku spěje k vysokému stupni kolaborativnosti a flexibility. Roboty provádí především úkony, které jsou pro lidské pracovníky nevhodné nebo nebezpečné s potřebnou přesností a opakovatelností,

4.1.1.6 Simulace

Fáze vývoje produktu dokáže ovlivnit veškerý následující životní cyklus, proto se klade důraz na průběžnou validaci vývoje. Jedním způsobem je simulace matematicko-fyzikálních modelů. V závislosti na produktu lze použít metody SIL (*Software-in-the-Loop*), HIL (*Hardware-in-the-Loop*), metoda konečných prvků, CFD (*Computational Fluid Dynamics*) apod. Díky simulaci a virtualizaci produktu lze lépe definovat funkční prvky.

Vedle simulace jako nástroje vývoje produktu má též simulace využití při technologickém projektování výroby pro optimalizaci spotřeby energie, nákladů na manipulaci, ergonomie nebo eliminaci různých druhů plýtvání.

Simulace výroby na operativní bázi dokáže podpořit skutečná naměřená data v modelování reálných strojů, produktů nebo lidí, a tím snížit výrobní časy nebo zabránit selhání zejména v raných fázích výroby.

4.1.1.7 Rozšířená realita

Systémy založené na rozšířené realitě podporují řadu služeb, například výběr dílů ve skladu nebo zasílání pokynů k opravám prostřednictvím mobilních zařízení. Průmysl může rozšířenou realitu využít k tomu, aby pracovníkům poskytoval informace v reálném čase a zlepšil tak rozhodování a pracovní postupy, např. virtuální asistence při opravě apod.

4.1.1.8 Kybernetická bezpečnost

Se stoupající dostupností připojením k systémům pomocí standardních protokolů stoupá také riziko kybernetických útoků na výrobní podniky. Proto je důležité vybrat bezpečný způsob komunikace a zabezpečit vhodně všechny přístupy a identity.

4.1.2 Základní principy

Základní principy jsou shrnuty v následujícím seznamu: (Vaidya et al. 2018)

- a) **Interoperabilita** – veškeré CPS z výrobního systému jsou schopny komunikovat mezi sebou prostřednictvím fyzikálních rozhraní nebo otevřených sítí a společné sémantiky
- b) **Virtualizace** – CPS kontroluje fyzický stav procesu díky digitálnímu dvojčeti (*digital twin*), které umožňuje dohledatelnost, možnost dálkového řízení a monitorování díky senzorům umístěným v celém výrobním procesu
- c) **Decentralizace** – vzrůstající poptávka po flexibilitě výroby a výrobkům na míru komplikuje centralizovaně řízený výrobní proces; nabízí se využití decentralizovaných metod řízení CPS pro udržitelné řízení v reálném čase
- d) **Real-time kapacita** – pro efektivní organizaci probíhá permanentní sběr a práce s daty v reálném čase; v případě poruchy stroje linka např. sama přesměruje výrobu na jiné stroje pro maximalizaci užité hodnoty
- e) **Orientace na služby** – podnikové služby, CPS a lidé jsou neustále propojení pomocí softwarových architektur orientovaných na služby ve spojení s konceptem IoS; propojení může být buď interní nebo i přes hranice podniku
- f) **Modularita** – modulární systémy mohou být přizpůsobeny změnám požadavků v krátkém čase prostřednictvím výměny jednotlivých modulů. Může se jednat o nároky sezonní, trendy v průmyslu nebo strategickou změnu výrobního profilu. Modulární systém může nabídnout i tržně atraktivní individualizaci produktu.

4.1.3 Digitalizace

V rámci snahy o co nejlepší výsledky není vztah mezi šířením digitálních technologií a jejich společenskými důsledky nikdy lineární a deterministický. Tzv. digitalizace průmyslu může být důležitým krokem k hospodářskému růstu, a pokud jde o práci, k vyšší produktivitě práce, zaměstnanosti a začleňování, se silným dopadem na procesy učení, vzdělávání lidského kapitálu a poptávku po práci.

Digitalizací se rozumí proces socioekonomické změny vyvolaný zaváděním technologií a digitálních systémů v celé výrobní síti, který vede k dalekosáhlým strukturálním změnám v obchodních modelech (Hirsch-Kreinsen 2016). Stejný autor rozlišuje dvě fáze digitalizace. První fáze probíhala do konce 90. let 20. století v odvětvích ekonomiky, kde výroba, spotřeba a komunikace byly základem nehmotných transakcí prostřednictvím dat a informací. Druhá fáze, zaměřená na digitalizaci všeho druhu, kterou nazývá "druhou vlnou", zahrnuje silný proces změny socioekonomických aspektů se zaváděním nových technologií. (Machado a Davim 2020)

4.1.4 Dopady Průmyslu 4.0

a) Přínos pro spotřebitele

Přínos pro spotřebitele je značný, ale tři nejvýznamnější benefity jsou pravděpodobně větší *možnosti přizpůsobení* výrobku preferencím a potřebám; *globalizovaný a digitalizovaný přístup*; a *rychlost*, což je spojeno s návratem továren na spotřebitelský trh, novými používanými technologiemi a větší kontrolou celého procesu.

b) Přínos pro výrobce

Existuje řada benefitů pro firmy, které se adaptují na Průmysl 4.0 a investují do technologií, opatření a reagují na tržní faktory. Podniky se stanou pohotovějšími, inovativnějšími a efektivnějšími a měly by zde mít příležitost zlepšit svou výkonnost.

c) Kritika

Důležitým tématem, které se pojí se změnou průmyslu, je potenciální ztráta pracovních míst. Řada autorů upozorňuje na možný strmý pád počtu pracovních pozic, např. (Hirsch-Kreinsen 2016) upozorňuje na obavy ze vzrůstu a polarizace kvalifikace pracovníků a možné principy pro udržitelnou digitalizaci. Machado a Davim (2020) uvádí, že většina studií zabývajících se tímto tématem nepředpovídá úbytek, ale změnu profilu pracovních pozic v průmyslu.

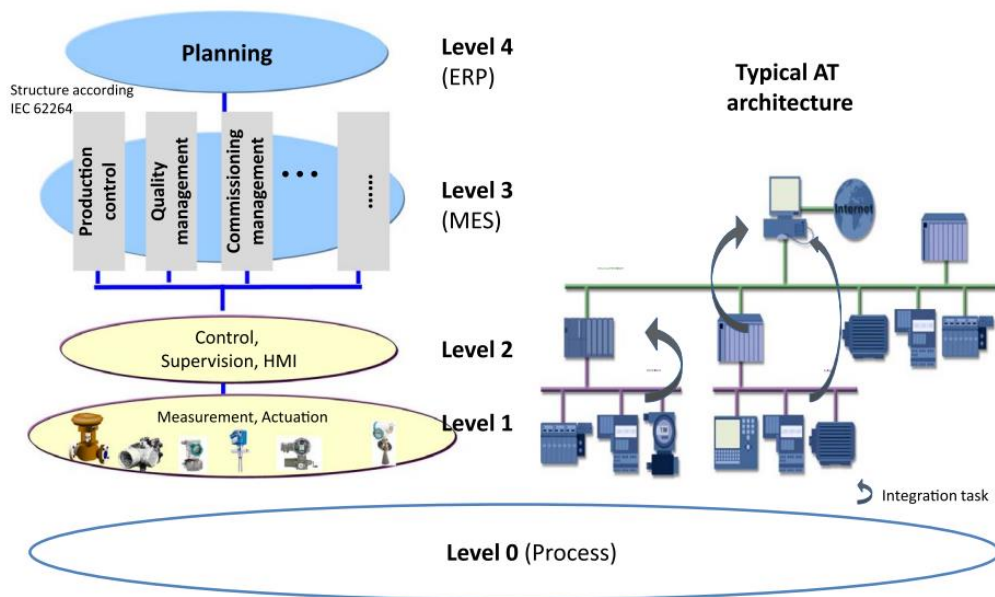
4.2 Systémová integrace

Klasické systémy automatizace fungují v zásadě ve třech základních rozměrech: podniková struktura, životní cyklus produktu a dodavatelský řetězec.

4.2.1 Podniková struktura

Základním prvkem podnikové struktury jsou zařízení vykonávající řízené procesy a měření. Tato zařízení jsou připojena k programovatelným logickým automatům (PLC) a systémům distribuovaného řízení (DCS). Sjednocení řízení je prováděno přes dohledové systémy (SCADA). SCADA systémy dohlíží na podřízené PLC a starají se o základní vyhodnocení dat a vstupy operátorů a dalších pracovníků díky uživatelskému rozhraní. Veškerá nasbíraná data o výrobě potom SCADA předává systémům pro realizaci nebo plánování výroby (MES, PPS). Nejvyšší vrstvou podniku je potom plánování podnikových prostředků (ERP).

Vhodné organizační struktury a informační a automatizační technologie (IT/AT) se vyvíjely souběžně. Avšak vzájemné přizpůsobení a zprostředkování představují velice nákladný úkol při budování větších systémů. Z toho důvodu existují technologie a principy jejich integrace v jeden funkční celek. (Bangemann et al. 2016)



Obrázek 4.2: Schéma automatizovaného výrobního systému (Bangemann et al. 2016)

4.2.2 Životní cyklus

Celkový životní cyklus je výsledkem mnoha způsobů využití principu třídy a instance. Zatímco konstrukční návrh zařízení vede k vytvoření jeho třídy, samotná výroba produkuje její instance. Každá třída zařízení má své charakteristické senzory. Instance těchto tříd tvoří celek celkového výrobního zařízení. Informace ze sensorů jsou použity pro virtuální model výrobního celku. Integrace je nutná pro propojení virtuální reprezentace strojů a zařízení s nástroji a dalšími objekty podél životního cyklu.

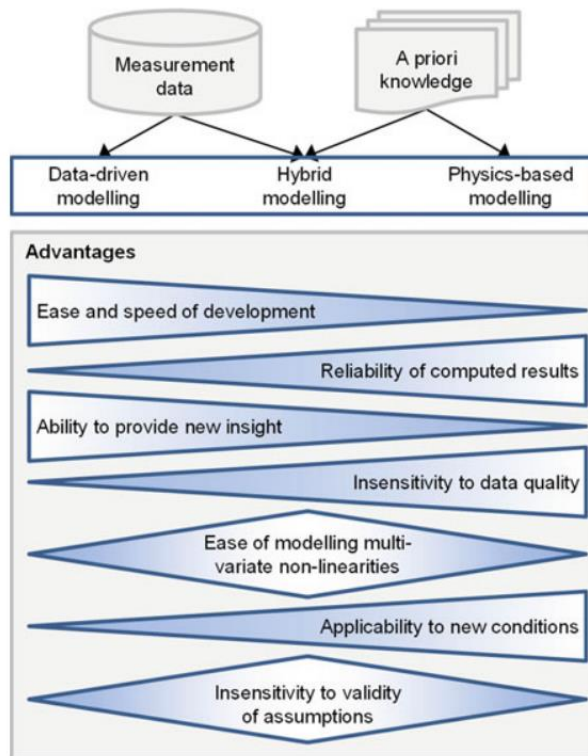
V rámci plánování výrobního procesu musí být zastoupeny funkce a vlastnosti použitého vybavení. To zahrnuje přesnou znalost veškerých funkčních i nefunkčních charakteristik. Všechny tyto vlastnosti jsou předmětem dohody mezi dodavateli a návrháři procesu. Pro jednoznačný popis vlastností se používá definovaná sémantika vlastností, např. Prolist, nebo eCl@ss (Dibowski et al. 2018).

4.2.3 Sémantické systémy

Systémy s velkým množstvím zařízení vyžadují nové přístupy k návrhu, integraci a provozu. Každé zařízení si nelze dovolit navrhovat zvlášť ani ztrácet znalosti v průběhu životního cyklu, protože jejich obnova je nákladná nebo nemožná. Proto se v automatizačním průmyslu již od 90. let používají přístupy modelování zařízení pro specifikaci a výměnu znalostí o zařízeních v průběhu životního cyklu. (Dibowski et al. 2018)

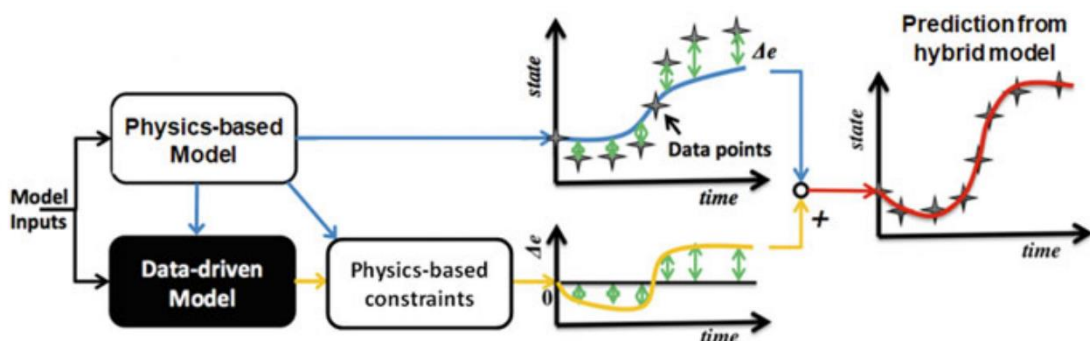
4.3 Prognostické a diagnostické modely

Prognostické a diagnostické modely mohou být založeny buď na fyzikálních a chemických vlastnostech provozu a mechanismech poruch daného aktiva, nebo na datech, tj. na statistických algoritmech nebo algoritmech strojového učení (ML).



Obrázek 4.3: Porovnání datových a a-priori modelů

Zatímco první z nich jsou lépe interpretovatelné, vyžadují také velké odborné znalosti v dané oblasti. V závislosti na složitosti zkoumaného stroje, zařízení nebo jevu mohou být přesné fyzikálně založené modely matematicky neřešitelné nebo výpočetně náročné. Naopak modely založené na datech jsou založeny na extrakci implicitních znalostí dostupných z minulých měření a mají tendenci mít širší použitelnost. Kombinací těchto dvou přístupů lze získat tzv. hybridní model. Zmíněné tři modely jsou též přezdívány „white box“, „black box“ a „grey box“. (Cerquitelli et al. 2021)



Obrázek 4.4: Funkční schéma hybridního modelu (Cerquitelli et al. 2021)

4.4 Údržba

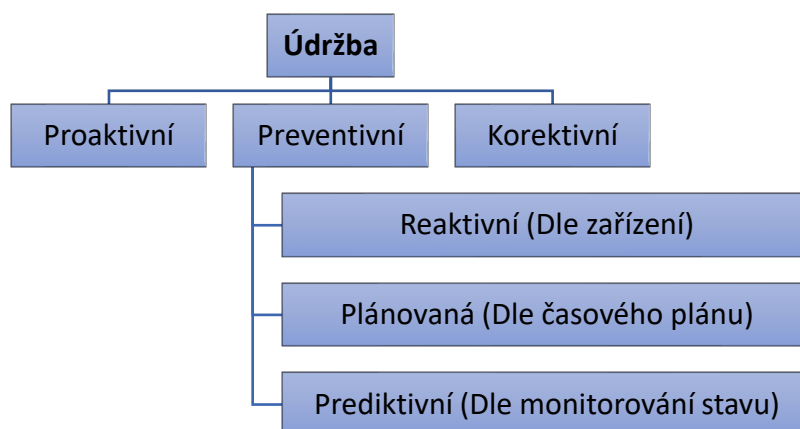
Údržbou technických systémů rozumíme kombinaci činností pro zajištění provozuschopného stavu a jeho obnovy v případě poruchy. Základními přínosy údržby jsou:

- Předcházení systémovým výpadkům
- Optimální připravenost zařízení
- Optimální operační podmínky
- Maximální využití zdrojů
- Optimální životnost strojů a zařízení
- Snížení počtu poruch a rychlá reakce na poruchy

Údržba je realizována samostatným organizačním útvarům. Náklady na údržbu výrobních závodů reprezentují podíl v rozmezí 15 % až 60 % dle použitých technologií a efektivity managementu. Obvyklým důvodem neefektivního řízení je nedostatek faktických údajů pro kvantifikaci skutečné potřeby oprav nebo údržby strojů, zařízení a systémů. Plánování údržby je ve většině případů založeno na statistických údajích o trendech nebo na skutečných poruchách zařízení závodu.

Vývoj mikroprocesorových nebo počítačových přístrojů, které lze použít ke sledování provozního stavu zařízení, strojů a systémů, poskytl prostředky pro řízení údržby. Díky tomu je možné omezit nebo vyloučit zbytečné opravy, zabránit katastrofickým poruchám strojů a snížit negativní dopad provozu údržby na ziskovost výrobních a produkčních závodů. (Mobley 2002)

Existují 3 základní typy údržby: korektivní, preventivní a proaktivní. Schéma dělení údržby je zobrazeno na obrázku Obrázek 4.5.



Obrázek 4.5: Základní typy údržby (Mobley 2002)

4.4.1 Korektivní

Korektivní údržba zahrnuje činnosti spojené s nápravou v případě havárií, oprav, náprav a neplánovaných komplikací. V současné době je většina údržby korektivní. Opravy budou nutné vždy. Zvyšování úrovně údržby a preventivní údržba však mohou snížit potřebu korektivní údržby. Nikoli na první pohled poškozené díly, ale odstraňování závad a diagnostické zjišťování a izolace poruch jsou hlavními spotřebiteli času při údržbě. Díky diagnostice lze příčiny izolovat a následně odstranit. (Mobley 2002)

4.4.2 Proaktivní

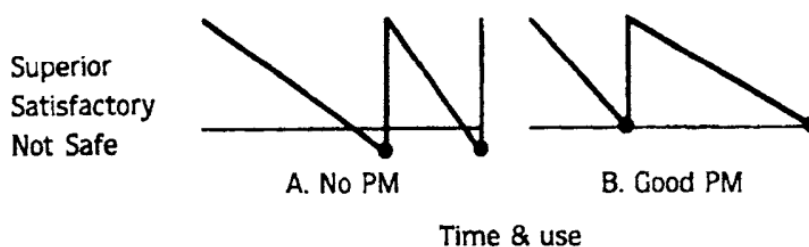
Častou chybou údržby je nedostatek plánování a odstraňování potřeby údržby u zdroje. Úsilí v oblasti spolehlivostního inženýrství by mělo klást důraz na eliminaci poruch, které vyžadují údržbu. Např. k mnoha poruchám zařízení dochází na komponentech, které jsou umístěny na tmavých, špinavých a nepřístupných místech.

Při údržbě se může stát, že nepřístupná ložiska nejsou mazána tak často jako ložiska, která jsou snadno přístupná. To je přirozená tendence, ale potřeba mazání by mohla být snížena použitím trvale mazaných ložisek s dlouhou životností. (Mobley 2002)

4.4.3 Preventivní

Preventivní údržba má zabránit neplánovaným odstávkám a předčasnému poškození zařízení, které by vedlo k nápravným nebo opravným činnostem.

Tento přístup k řízení údržby se převážně řídí časovým plánem nebo opakujícími se úkoly, jako je mazání a seřizování, které jsou navrženy tak, aby udržovaly přijatelnou úroveň spolehlivosti a dostupnosti. Z pohledu preventivní údržby představují problémy a příčiny, které vedou k poruchám, cíle pro odstranění pomocí životaschopné preventivní údržby. Úkolem je odhalit počínající problémy dříve, než povedou k úplným poruchám, a odstranit závady s co nejnižšími náklady.



Obrázek 4.6: Znázornění vhodné preventivní údržby

4.4.3.1 Prediktivní údržba

Statistika a teorie pravděpodobnosti jsou základem pro údržbu pomocí monitorování stavu. Detekce trendů prostřednictvím analýzy dat často nabízí vhled do příčin poruch a preventivních opatření, která pomohou předejít budoucím poruchám. Například světla na stadionu přestanou fungovat v úzkém časovém rozmezí. Pokud již 10 % světel nefunguje, lze přesně předpokládat, že brzy selže i zbytek a že by se měla co nejeфекtivněji vyměnit jako skupina, nikoli jednotlivě.

V rámci komplexního programu prediktivní údržby lze a mělo by se využívat různých technologií. Monitorování vibrací je obecně klíčovou součástí většiny programů prediktivní údržby. Tato technika se omezuje na sledování mechanického stavu, nikoliv na další kritické parametry potřebné k udržení spolehlivosti a účinnosti strojního zařízení. Dalšími technikami prediktivní údržby jsou termografie, tribologie, ultrasonické metody, testy elektrických zařízení nebo také vizuální metody. (Mobley 2002)

Pro vyhodnocování dostupných dat mohou být použité prognostické modely popsané v kapitole 4.3. Tři fáze, ve kterých se vytvářejí a provozují služby prediktivní analýzy jsou: (Cerquitelli et al. 2021)

1. *Tvorba modelu* – výběr typu modelu, výběr typu dat (různé domény), návrh zpracování dat
2. *Nasazení modelu* – vytváření nových předpovědí nebo odvozování nových znalostí z dat získaných z distribuovaných senzorů; online předpovědi v reálném čase na základě datových toků získaných, shromážděných a zpracovaných prostřednictvím specializované analytické infrastruktury
3. *Aktualizace modelu* – reakce na vývoj vyhodnocovaných dat v čase (degradace zařízení, nové módy provozu apod.); model je částečně přizpůsobován dlouhodobým změnám, buď pasivně nebo aktivně

5 Představení společnosti P-D Refractories CZ a.s.

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou P-D Refractories CZ a.s. ve Svitavách. Jedná se o jednoho z největších výrobců a dodavatelů žárovzdorných výrobků a surovin. Společnost sídlí ve Velkých Opatovicích. Součástí akciové společnosti jsou dva výrobní závody (Velké Opatovice a Svitavy) a dva lomy (Březina a Březinka). Společnost vyrábí a dodává materiál pro kompletní i částečné vyzdívky pro tepelná zařízení, především pro koksovou pec, vysokou pec, sklářské peci, elektrolyzéry primární výroby hliníku a další.

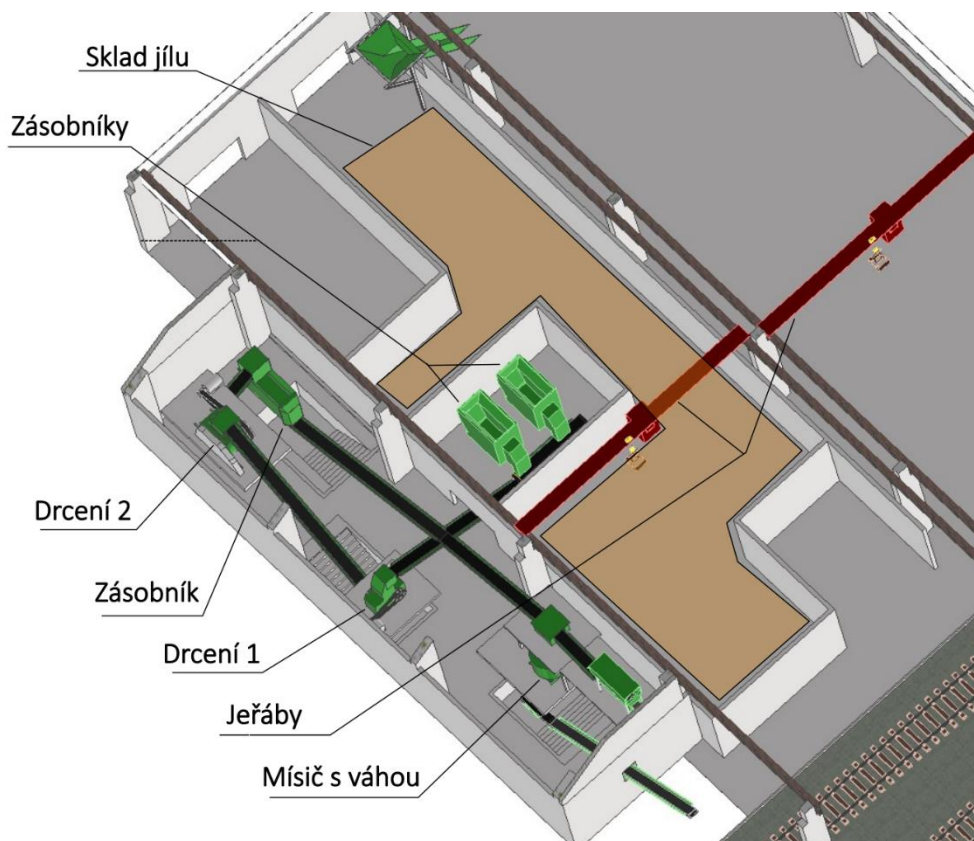


Obrázek 5.1: Výrobní závod P-D Refractories CZ a.s. Svitavy

Výrobní sortiment zahrnuje žárovzdorné kameny, žárovzdorné jíly a ostřiva, komínové vložky, žárovzdorné malty, tmely a betony. Společnost je vybavena moderním výrobním a zkušebním zařízením, které garantuje vysokou stabilní výrobní kvalitu. Společnost zabezpečuje také dodávky modifikovaných kvalit podle individuálního přání zákazníka.

6 Analýza současného stavu

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh optimální volby zpracovatelské technologie a sběru dat pro sklad a přípravu jílové směsi na výrobu žárovzdorného zboží. Návrh řešení se opírá o analýzu současného stavu, která zahrnuje analýzu materiálu v průběhu celého procesu, jeho sezónní vývoj, popis současně používané technologie a měřená data pro zavedení průmyslových datových modelů. Veškeré aspekty analýzy jsou posléze porovnány s požadavky navazujících kroků celkového výrobního procesu.



Obrázek 6.1: 3D model současného stavu

Na obrázku Obrázek 6.1 je zobrazen 3D model současného stavu zahrnující sklad (vpravo) a přípravu materiálu se zpracovatelskou technologií (vlevo).

6.1 Produkt

Produkty výrobní linky, která je předmětem této diplomové práce, jsou žárovzdorné komínové vložky. Tyto vložky odpovídají požadavkům popsaným normou ČSN EN 1457-1 (posléze ČSN EN 1457-2): Komíny – Keramické komínové vložky. Výrobce zároveň deklaruje základní charakteristiky, např. plynotěsnost, průtokový odpor, tepelný odpor, požární odolnost a další.

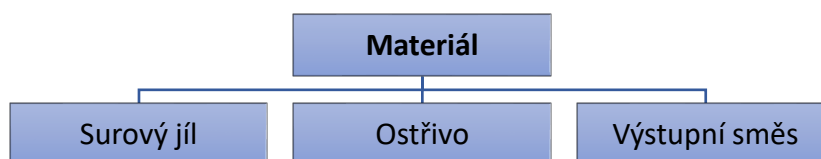
Komínové vložky jsou vyráběny z připravované jílové směsi. Ta je dopravována vnitřní podnikovou přepravou do zakladače v lisovně. Ze zakladače ji postupně dopravník dávkuje do extrudéru, který vytlačuje polotovar. Rybinová drážka je na polotovaru vyhotovena na moderní automatické lince, která vyjímá hotové polotovary z extrudéru a podává je na jednoúčelové obráběcí stroje pro další zpracování zasyrova. Komplettní obrobené polotovary se skládají na palety, kde postupně vysychají. Posledním krokem výroby je výpal, při kterém dojde primárně ke smrštění, zvýšení pevnosti, změně barvy a dalších vlastností. Roční objem výroby činí 15 000 tun.



Obrázek 6.2: Komínová vložka

6.2 Materiál

Materiál pro výrobu komínových vložek je do výroby dodáván externí firmou. Jedná se o žárovzdornou plastickou směs jílu s parametry vyhovujícími výrobě daného produktu. Tyto parametry mají v rámci smluvených mezí určitý rozptyl. Ten je nutno kompenzovat robustně navrženým zpracovatelským procesem, tak aby výstupní materiál odpovídal výrobní normě. Tato kapitola se zaměří na materiálové vstupy a výstupy, viz obrázek Obrázek 6.3.



Obrázek 6.3: Schéma analýzy současného stavu materiálu

6.2.1 Surový jíl

Jílová surovina je dodavatelem vytěžena, rozpojena a namíchána dle požadovaného složení. Vlastnosti vstupního materiálu jsou zakotvené v materiálovém listu, nicméně materiál je při dodávce testován vybranými postupy pro ověření aktuálních hodnot.

Tabulka 6.1: Parametry vstupního materiálu

Vlastnosti	Hodnoty (rozpětí hodnot)	
Vlhkost	17,2 ± 2,68 %	
Velikost zrna	0 mm až 100 mm	
Granulometrická skladba	>2 mm	0,47 ± 0,08 %
	1 mm až 2 mm	0,86 ± 0,14 %
	0,5 mm až 1 mm	0,91 ± 0,07 %
	0,2 mm až 0,5 mm	1,30 ± 0,13 %
	0,09 mm až 0,2 mm	1,65 ± 0,26 %
	<0,09 mm	94,80 ± 1,37 %
Chemické složení	SiO ₂	59,35 ± 4,34 %
	Al ₂ O ₃	30,29 ± 3,42 %
	Fe ₂ O ₃	3,10 ± 0,14 %
	TiO ₂	1,20 ± 0,07 %
	K ₂ O	3,70 ± 0,11 %
	CaO	0,18 ± 0,09 %
	Na ₂ O	0,45 ± 0,01 %
	MgO	1,53 ± 0,57 %

a) Vlhkost

Vlhkost dodávané jílové suroviny je důležitým technologickým parametrem pro její zpracování, viz Kapitola 1.2.4.2. Vzhledem k okolnostem dodávky je její hodnota velmi nestálá. V letním období se její hodnota pohybuje na minimech okolo 12 % až 15 %. V zimě, kdy probíhá těžba za vlhkého počasí, dosahuje její hodnota maxim okolo 20 % až 23 %.

Hodnota vlhkosti se v podniku měří laboratorně pomocí gravimetrické metody na odebraných vzorcích při dodávce. Díky tomu je udržován odhad obsahu vlhkosti celkové navážky. Historicky byla vlhkost měřena také kontinuálně pomocí mikrovlnného senzoru vlhkosti na pásovém dopravníku. Cílem průběžného měření bylo určit průměrnou hodnotu vlhkosti suroviny pro smíšení s optimálním množstvím vody.

Tento přístup se nepodařilo vhodně odladit a vlhkost konečné směsi byla těžce říditelná. Z toho důvodu je nyní regulace množství přidané vody řízena ručně kombinací výsledků dávkových měření a zkušeností operátora výroby.

b) Velikost zrna

Velikost zrna (hrudek) dováženého materiálu je technologicky významný parametr pro jeho úpravu. Prvním důvodem je homogenizace vlastností materiálu ve skladu – při naskladňování materiálu s odchylkami vlhkosti a mechanických vlastností je zapotřebí ho nechat odležet. Drobnější zrno znamená rychlejší proces homogenizace.

Drobnější zrno také ulehčí zpracovatelský proces, neboť pro zdrobnění na požadovanou zrnitost je zapotřebí nižší redukční poměr zdrobňovací technologie.



Obrázek 6.4: Uskladněný surový materiál

Hmotností poměr frakcí jílu je poměrně rozmanitý a nekonstantní. Velikost zrn se pohybuje v řádech jednotek μm až stovek mm . Jedná se také o sezonně závislý materiálový parametr. Na obrázku Obrázek 6.4 lze pozorovat stav materiálové navážky v období konce září. Jemná suchá letní zavážka se mísí s vlhkou hrubší zavážkou typickou pro vlhké počasí typické pro ostatní roční období. V období zimy je problematika velikosti zrna umocněna tuhnutím zrn při mrazivém počasí, neboť sklad materiálu není vytápěn.

c) Granulometrická skladba

Granulometrická skladba se odvíjí od množství faktorů. Surový jíl je nutno drtit, třídit, rozdužovat apod., což jsou procesy zajištěné v tomto případě dodavatelem materiálu. Tím jsou vyřazeny tvrdé hrubší frakce. Granulometrie závisí též na lokalitě těžby nebo lokální čistotě jílového ložiska, a na rozdíl od vlhkosti není závislá na sezonních podmínkách. Z hlediska granulometrie je dodávaný materiál poměrně stabilní. Měření granulometrické skladby je realizováno dávkově pomocí síťového rozboru, který je popsán v kapitole 3.7.1.

Hodnota této charakteristiky spočívá především v ověření správného poměru jednotlivých frakcí materiálu dle výrobního předpisu a také pro analýzu obsahu hrubých frakcí. Hrubé frakce (nad 2 mm) jsou nežádoucí složkou. Při vypalování totiž dochází ke smršťování objemu výpalku a hrubší částice na povrchu tvoří nedokonalosti v podobě různých výstupků a nerovností. Hrubé frakce jsou redukovány pomocí drticích strojů v přípravně, ale jejich vyšší obsah nemusí být v přípravně plně redukován.

d) Chemické složení

Chemické složení závisí na lokalitě těžby a lokálním složení jílového ložiska. Jak bylo řečeno v kapitole 1.2.3, chemické složení ovlivňuje různé fyzikální vlastnosti. Pro vypalované žárovzdorné výrobky jsou vlastnosti zájmu z hlediska chemického složení především pevnostní charakteristiky a kvalitu výpalků. Jeho měření slouží jako vstupní kontrola materiálu. V případě odchylek od smluvených hodnot má firma právo materiál reklamovat.

Chemické složení vstupního materiálu je specifikováno v tabulce Tabulka 6.1. Dle uvedeného rozptylu je vidět, že dodávaný materiál je poměrně stabilní. Pohybuje se v řádech jednotek procent. Chemické složení je během procesu lehce modifikováno přídavkem ostřiva.

6.2.2 Ostřivo

Ostřivo je aditivum jílového materiálu pro snížení plasticity materiálu. Jeho přídavek je zásadní pro výrobu extrudovaných produktů a jeho význam je přiblížen v kapitole 1.2.3b. Jako ostřivo se v tomto podniku používá směs páleného zlomu ze zmetků z výroby a páleného lupku. Obě složky ostřiva jsou velmi suché s obsahem vlhkosti $0,36 \pm 0,09$ % a $0,28 \pm 0,07$ %. Na rozdíl od jílu, granulometrická skladba ostřiva má vyváženější poměr obsahu jednotlivých frakcí.

6.2.3 Výstupní směs

Výstupní materiál je směs jílu, ostřiva a přídavku vody. Jíl a ostřivo jsou smíchány v daném poměru a voda je doplněna do směsi dle cílové vlhkosti vhodné pro navazující technologie. Vlhkost výstupní směsi je v průměru 13,3 % a oproti vstupnímu materiálu má stabilnější charakter. Rozptyl vlhkosti výstupu činí 0,49 %, oproti 2,68 % u vstupu.

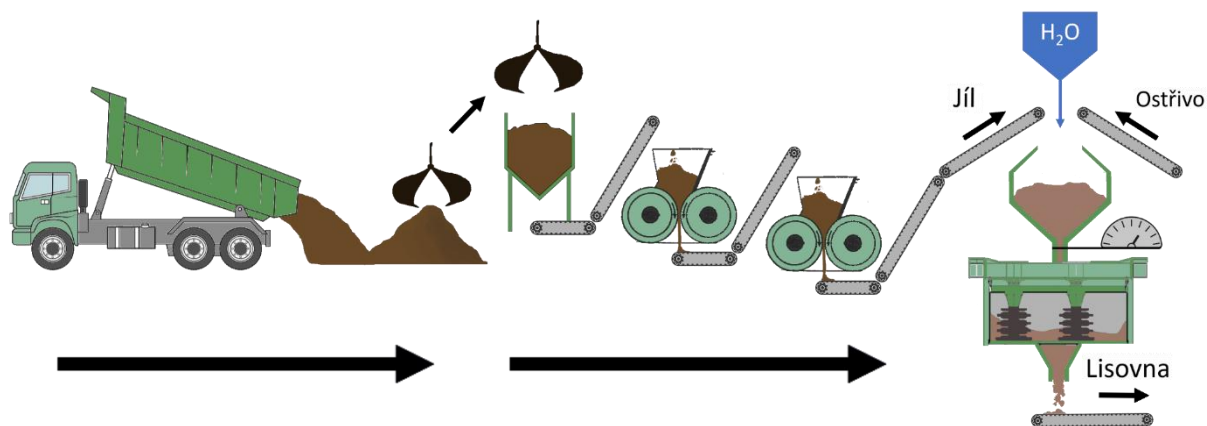
Tabulka 6.2: Parametry výstupního materiálu přípravy

Vlastnosti	Hodnoty (rozpětí hodnot)
Vlhkost	$13,3 \pm 0,49$ %
Velikost zrna	0 mm až 3 mm

Oproti jemnozrnnému surovému jílu naroste u výsledné směsi hmotnostní podíl středně hrubých frakcí ($0,09$ mm ÷ 2 mm). To je způsobeno přídavkem ostřiva, které je obsahuje. Výsledný materiál má o řád vyšší rozptyl granulometrie ve srovnání se surovým jílem. Tento rozptyl je dán technologií přípravy a charakterem ostřiva a nemá zásadní vliv na technologické vlastnosti.

6.3 Technologie a proces zpracování

Proces úpravy jílu probíhá v přípravně, jejíž technologická vybavení výrobní postup jsou popsány v této kapitole. Popis se věnuje konkrétnímu výběru strojů a problémům spojeným s jednotlivými segmenty výrobního procesu.



Obrázek 6.5: Schéma výrobního řetězce

Výrobní proces je popsán chronologicky a odpovídá schématu na obrázku Obrázek 6.5. Pořadí operací výrobního procesu je *vykládka a skladování, drcení 1, drcení 2, vážení, mísení*.

6.3.1 Skladování

Jíl je dovážen nákladní dopravou do skladu. Pomocí mostového jeřábu a nakladače se navážený jíl vrší ve vyhrazeném skladovacím boxu tak, aby kapacita byla využita co nejeфективněji. Maximální kapacita tohoto boxu potom dosahuje 2500 t jílu.

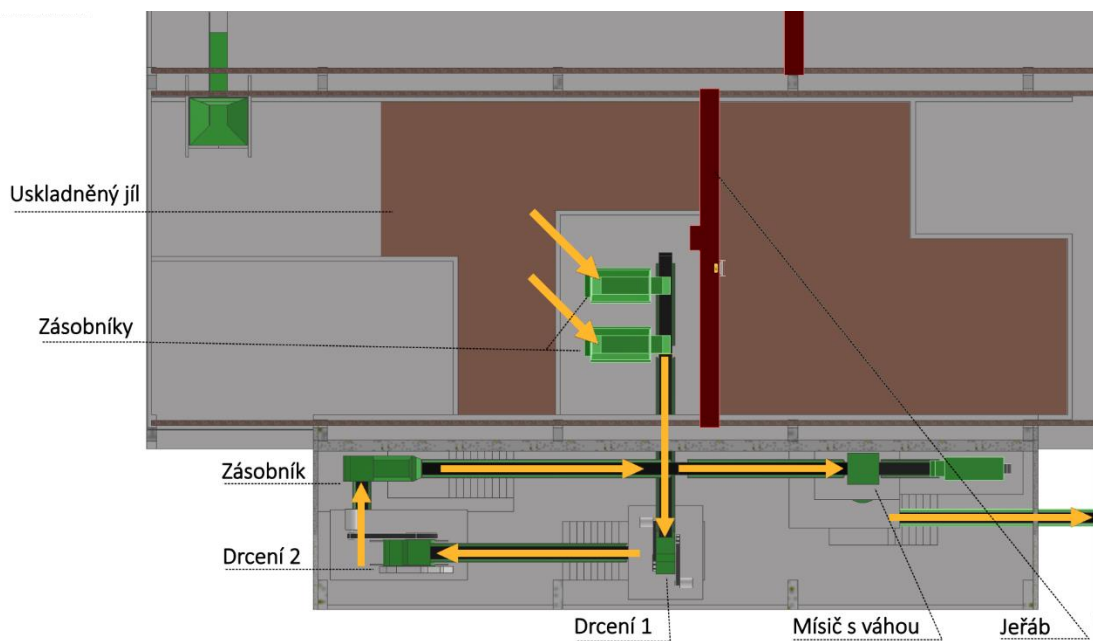
V rámci skladovacího procesu se nepostupuje dle žádného systematického postupu třídění materiálu dle vlhkosti nebo data navážky. Odebírání materiálu je realizováno také mostovým jeřábem, který plní přilehlý zásobník, ze kterého se postupně odebírá materiál pro další zpracování. Při odebírání též není předepsán konkrétní postup. Do zásobníku je proto nakládán materiál z libovolné oblasti skladovacího boxu dle uvážení operátora jeřábu. Z toho důvodu mísí jíly různé zrnitosti a vlhkosti.

6.3.2 Buffer před výrobou

Buffer těsně před výrobou plněný mostovým jeřábem plní funkci regulace toku materiálu do přípravny. Skládá se ze dvou paralelních zásobníků s odebíráním materiálu pomocí pásového dopravníku se škrabkou. Dva zásobníky jsou výhodné v případě poruchy jednoho z nich a zároveň díky možnosti dávkovat rozdílné jakosti materiálu do výroby, např. sušší a vlhčí.

6.3.3 Drcení 1

První operací je drcení na válcovém drtiči s hladkými válci. Válce se otáčejí stejnou rychlostí. Základní specifikace stroje jsou uvedeny v tabulce Tabulka 6.3. Dle terminologie z kapitoly 2.7 se jedná o sekundární drcení, neboť zrna dodávaného jílu v drtivé míře nedosahují 150 mm. První drticí operace redukuje vstupní surovinu s velkým rozptylem velikosti zrn na jemnější. Výstup této operace obsahuje zploštělé hrudky o maximální tloušťce 6 mm. Zároveň dojde k podrcení velmi hrubé frakce o charakteristickém rozměru 6 mm a více.



Obrázek 6.6: Současný výrobní proces

Problematickým je období vlhké zavázky, kdy drtič s hladkými válci trpí kvůli zvýšené přilnavosti vlhkého jílu na ocelové válce. Pro tento případ jsou válce opatřeny škrabkami, které přilepený materiál odstraňují. Nicméně, výroba v takovém módu je problematická a musí se často odstavovat z důvodu zanášení stroje. Zpracovávaný jíl je velice soudržný, proto výstupem válcování jsou tenké aglomeráty o rozměrech desítek až stovek milimetrů (tzv. „sloní uši“). Problém soudržného jílu platí také pro případ nehomogenní vlhkosti, kdy materiál optimální vlhkosti obsahuje velmi plastická zrna o vyšší vlhkosti.

6.3.4 Drcení 2

Druhá drticí operace je realizována též válcovým drtičem s hladkými válci. Oproti prvnímu stroji, ten druhý má o 25 % větší průměr válců a výkonnější pohon. Mezera mezi válci je široká 2 mm a dochází k dalšímu zjemnění jílových zrn a podrcení zbytku hrubších frakcí. V případě nekontrolovaného vniknutí tvrdého tělesa mezi válce stroje

je zajištěno bezpečnostní vypnutí pomocí střižného plechu. Pohyb válců je zaznamenán pomocí sondy, viz Obr. Obrázek 6.7.

Tabulka 6.3: Specifikace drtičů

Drcení	Drtilí stroj	Průměr válce	Mezera	Počet motorů	Výkon	Pojištění
1	Válcový drtič s hladkými válci	1000 mm	6 mm	2	2x22 kW	Střižný plech
2	Válcový drtič s hladkými válci	1250 mm	2 mm	1	110 kW	Střižný plech

Problémem této operace jsou podlouhlé hrubší částice, které mezi válce drtiče vstupují tečně a nedojde k jejich redukci. Jedná se o případy statisticky vzácné. Pokud se tyto částice nezredukuje v procesu mísení, způsobují vady na konečných produktech. Dalším problémem je opět období vlhké zavážky, kdy pro tuto operaci platí stejný problém jako v případě prvního stroje.



Obrázek 6.7: Bezpečnostní vypínač při přestřižení plechu

6.3.5 Buffer před vážením

Rozmělněný materiál je přiváděn dopravníkem do dalšího zásobníku. Tento zásobník slouží k vyrovnání toků drceného materiálu a materiálu, který míří na váhu. Oba toky mají rozdílný charakter. Drcení je proces kontinuální a vážení se odehrává po dávkách, proto je použití zásobníku nutné. Jeho provedení je podobné zásobníku ve skladu – drcený materiál plní tělo násypky a materiál je na dně postupně odebírán pomocí pásového dopravníku a škrabky na další pás.

6.3.6 Vážení

Materiál po úpravě je ze zásobníku dopraven do násypky průmyslové váhy sypkých směsí od firmy JAS s. r. o. Do této nádoby se k drcenému jílu přidá také ostřivo v poměru stanoveném výrobní recepturou. Obě složky jsou dopravovány pásovými dopravníky střídavě tak, aby došlo k mísení již při vážení. Jedna vážená dávka k mísení váží zhruba 1100 kg.

6.3.7 Mísení a homogenizace

Vážený materiál se po zvážení uvolní do mísiče, který je umístěn pod výstupem z váhy. Jedná se o vířivý mísič se svislou osou a jednou rychloběžnou turbínou. Homogenizace směsi je v případě vířivého mísiče dosaženo mícháním. Díky rychloběžné turbíně je navíc redukována velikost zrna principem nárazu.



Obrázek 6.8: Drcený materiál v bufferu před mísičem

Směs jílu a ostřiva je doplněna množstvím vody závislém na momentálním obsahu vlhkosti směsi. Jak bylo popsáno v kapitole **Error! Reference source not found.**, vlhkost je ovlivněna ročním obdobím, okolnostmi navážky a těž volbou obsluhy jeřábu z jaké části skladu materiál odebere. Regulace množství přidané vody za takového stavu je těžko automatizovatelná, proto o množství přidané vody volí operátor výroby na základě zkušenosti.

6.3.8 Manipulační technika

a) Mostový jeřáb

Mostový jeřáb s nosností 5000 kg se nachází ve skladu. Vedle podávání materiálu do zásobníku před výrobou slouží také k uspořádání navezeného materiálu nákladními vozy. Jeřáb může být obsluhován pouze kvalifikovanou obsluhou, což může vést k nedostatku lidských zdrojů při nárůstu objemu výroby.



Obrázek 6.9: Mostový jeřáb nad skladovacím boxem

b) Nakladač

Nakladače jsou univerzální prostředky manipulace se sypkými materiály. Při navážení materiálu jsou dostupné nakladače využity pro přemísťování jílu ve skladu. Jejich výhodou je jejich univerzálnost a větší dostupnost obsluhy.

c) Pásový a segmentový dopravník

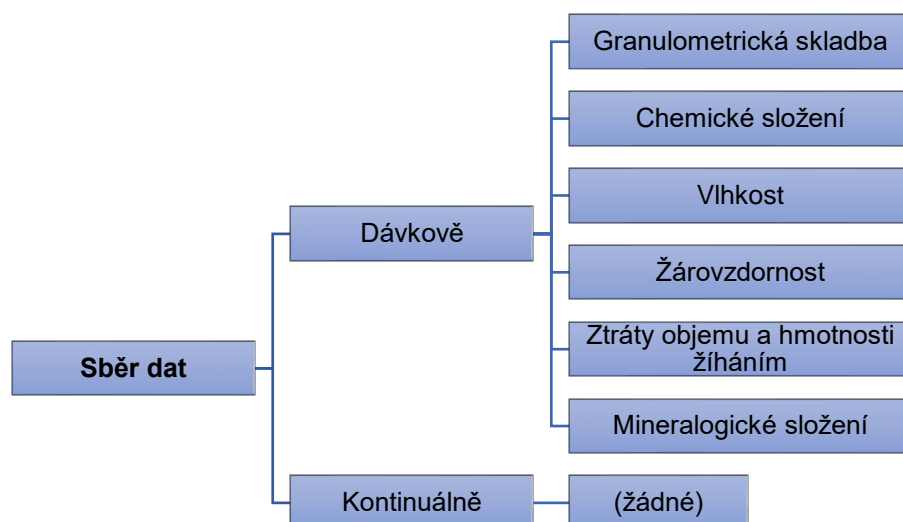
Pásový a segmentový dopravník jsou primárními formami vnitropodnikové přepravy využívané v přípravně. Jedná se o plně automatizovanou spolehlivou formu manipulace materiálu mezi technologiemi. Pásový dopravník je volen u veškerých dopravníků do úhlu sklonu 20°. V přípravně se nachází také dva dopravníky o úhlu sklonu 30°, které jsou segmentové.



Obrázek 6.10: a) Pásový dopravník b) Segmentový dopravník

6.3.9 Sběr dat

Sběr dat v přípravně probíhá výhradně dávkově, a to pouze na vstupním a výstupním materiálu. V přípravně neprobíhá monitorování stavu technologií ani nepřímá měření výrobního procesu. Metody a vyhodnocování dat jsou specifikovány v následujících bodech.



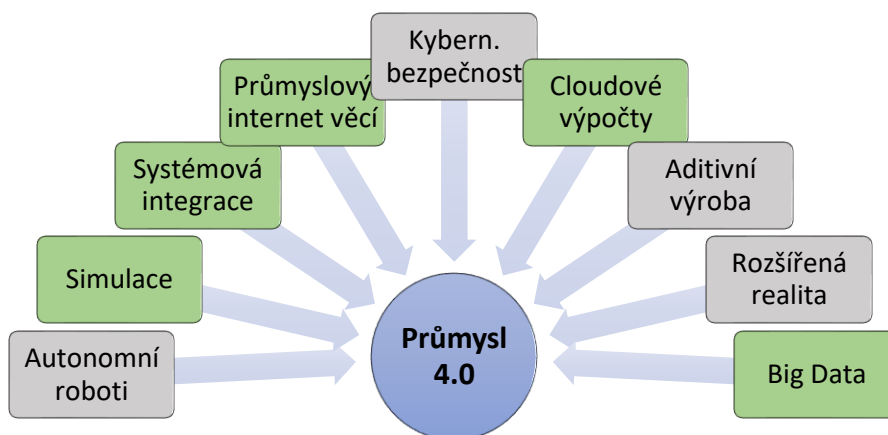
Obrázek 6.11: Schéma současných datových zdrojů

- a) *Granulometrická skladba* – měření granulometrie probíhá laboratorně sítovým rozborem dle normy ČSN 72 1565-3 na vybraných vzorcích o určitém intervalu.
- b) *Chemické složení* – chemické složení je analyzováno pomocí spektrometrické metody, jako je uvedeno v kapitole **Error! Reference source not found..** Měření je též prováděno laboratorně na vybraných vzorcích materiálu. Chemické složení se měří převážně jako vstupní kontrola dodávaného materiálu
- c) *Vlhkost* – vlhkost je měřena gravimetrickou metodou dle normy ČSN 72 1565-1 pomocí speciálních vah s ohřevem. Princip této metody je uveden v kapitole 3.1.1.
- d) *Žárovzdornost* – dávkové laboratorní měření pomocí žároměrné shody dle normy ČSN 72 6020 je prováděno též laboratorně na vybraných vzorcích.
- e) *Ztráty objemu a hmotnosti žiháním* – dávkové měření dle normy ČSN 72 1565-5 a ČSN 72 1565-6 na zkušebních těliscích vyrobených a vypálených podle normy ČSN 72 1565-4.
- f) *Mineralogické složení* – mineralogické složení se měří dávkově na vybraných vzorcích pomocí metody WDXRF (wavelength dispersive X-ray fluorescence), tedy spektrometricky pomocí rentgenového záření, viz kapitola **Error! Reference source not found..** Měření, stejně jako u chemického složení, slouží především jako vstupní kontrola materiálu.
- g) *Hmotnost* – vážení materiálu probíhá bezprostředně před mísením složek směsi na průmyslové váze na sypké hmoty od firmy JAS s. r. o. Data z vážení

jsou používána v reálném čase pro správný poměr složek směsi, nicméně nejsou nijak dále využívána.

6.4 Analýza z pohledu Průmyslu 4.0

Průmysl 4.0 přináší do podnikového řízení a technologie nové přístupy, které jsou popsány v kapitole 4.1. Analýza výrobního procesu z pohledu 4.0 se zaměřuje na identifikaci příležitostí využití těchto principů napříč stávající údržbou a výrobou. Výběr ze základních komponent Průmyslu 4.0 s potenciálem pro využití při tomto projektu je znázorněn na obrázku Obrázek 6.12.



Obrázek 6.12: Zvolené komponenty Průmyslu 4.0

Součástí analýzy výrobního procesu z pohledu Průmyslu 4.0 jsou zjištění stavu údržby linky jako příležitost pro monitoring stavů strojů a identifikace příležitostí aplikace jednotlivých komponent Průmyslu 4.0 ve výrobě.

6.4.1 Údržba a monitoring

Údržba strojů v přípravně jílové směsi je převážně preventivní a korektivní. Na strojích dle jejich charakteristických potřeb probíhají pravidelné plánované údržby, např. mazání, výměna ložisek, výměna mísící turbíny apod. V případech poruch údržba reaguje opravou a obnovením provozu. Jelikož nedochází k ukládání dat, neexistuje podklad k žádnému typu datově orientované prediktivní analýzy.

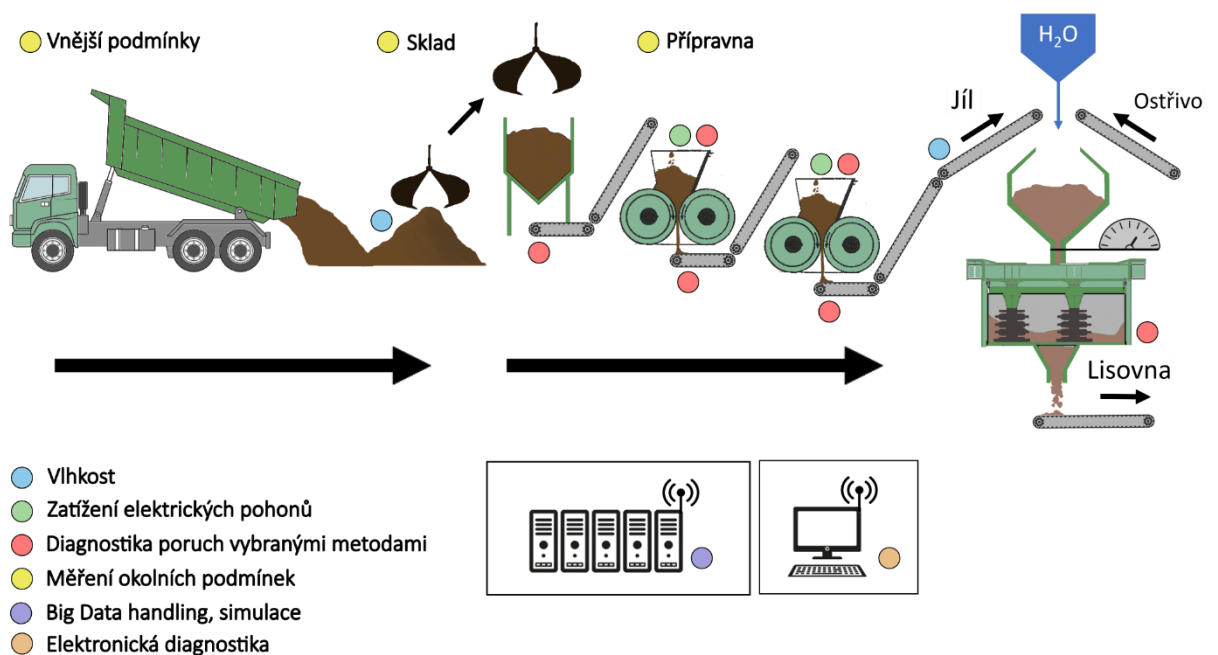
Přípravna není úzkým místem výroby, i přesto ale údržba podpořená monitorováním stavů technologie dokáže ušetřit prostředky. Hlavními výhodami jsou efektivnější plánování preventivní údržby, včasný levnější zásah před poruchou apod., viz kapitola 4.4.

Nejvýznamnějšími stroji, které je vhodné monitorovat z důvodu charakteru jejich zatížení, jsou elektrické pohony na drtičích, manipulátorech a v mísiči. Typickými monitorovanými veličinami jsou:

- a) Vibrační spektrum
- b) Otáčky
- c) Zatížení motorů
- d) Ultrasonické metody
- e) Termografie

6.4.2 Výroba

Současná výroba není orientována dle Průmyslu 4.0. Schéma na obrázku Obrázek 6.13 přímo identifikuje příležitosti principů PR40 u konkrétních segmentů výroby přípravy jílové směsi.



Obrázek 6.13: Analýza výrobního procesu z pohledu Průmyslu 4.0

Stěžejním bodem výrobního procesu je správná regulace vlhkosti směsi. Naznačené schéma obsahuje symbol simulace, která je zahrnuta zejména pro stavbu hybridního modelu stavu vlhkosti. Takový model vychází z přímých měření (senzory vlhkosti) i nepřímých (historická data, měření ostatních technologií) a přináší robustnější výsledky ve srovnání s výhradně přímým měřením.

6.5 Požadavky výrobního procesu

Výstupem současného výrobního procesu je směs jílu a ostřiva o parametrech, které jsou shrnuty v tabulce Tabulka 6.4. Současný podíl zmetků ve výrobě komínových rour tvoří 3 % u vypálených výrobků a 5 % u nevypálených. Motivací pro návrh současného stavu je snížit podíl zmetků pomocí stabilnější vstupní suroviny. Dle konzultace s odborníky z firmy P-D refractories CZ a.s. jsou požadované hodnoty řešení rovny hodnotám uvedeným též v tabulce Tabulka 6.4.

Tabulka 6.4: Shrnutí požadavků na proces zpracování

Vlastnost	Hodnota	Požadovaná hodnota	Splněno
Rozptyl vlhkosti	0,49 %	0,05 %	NE
Velikost zrna	2-3 mm	1 mm	NE
Hrubé frakce (nad 1 mm)	1,57 %	0,1 %	NE

7 Vlastní návrh

Na základě analýzy současného stavu a řešerše problematiky je v práci prezentován návrh technologie a sběru dat. V kapitole 6.5 byly specifikovány stěžejní problémy výroby. Další motivace návrhu vychází zejména z potřeby robustnějšího a efektivnějšího výrobního procesu nebo monitoringu stavu technologie a materiálu na základě datových modelů. Pro výběr vhodných variant je použita multikriteriální analýza. Tato kapitola je strukturována dle schématu na obrázku Obrázek 7.1. Z hlediska charakteru navrhovaných komponent je celkový vlastní návrh rozdělen do základních segmentů, které jsou popsány na obrázku Obrázek 7.3



Obrázek 7.1: Postup vlastního návrhu

7.1 Okrajové podmínky návrhu:

Okrajové podmínky návrhu ohraničují možné návrhy řešení na základě preference firmy. Zde jsou vymezeny následující okrajové podmínky:

1. Objem výroby 10 000 až 15 000 t trubek výroba ročně
2. Výrobní proces se odehrává v prostorech výrobní haly
3. Surovina je navážena postupně
4. V zimním období je jíl vystaven mrazu
5. Primárně využití technologie současné výroby
6. Omezený rozpočet (nízké desítky milionů)

7.2 Rozhodovací metoda

Návrh technologického řešení přípravný je komplexní projekt, který je potřeba dekomponovat na jednotlivé funkční komponenty a věnovat pozornost každé zvlášť. Každá komponenta může být navržena několika alternativními způsoby, které je nutno analyzovat a přizpůsobit potřebám firmy a vzájemným okrajovým podmínkám. Této problematice se věnují metody tzv. multikriteriální rozhodovací analýzy (MCDA). Cinelli et al. (2014) popsal ve své práci několik metod MCDA a posuzoval jejich použitelnost pro úlohu rozhodování na poli udržitelnosti. Metody MCDA jsou univerzální, strukturované a spolehlivé, zejména při rozhodnutích, do kterých vstupují různorodé skupiny.

Mezi metody MCDA se řadí např.:

a) Multiple Attribute Utility Theory (MAUT)

MAUT je metoda, která spočívá ve vytvoření sady unikátních hodnotících kritérií. Na základě nezávislých parametrů alternativ jsou vytvořeny cenové funkce, kterým je přiřazena váha. MAUT má dvě verze výpočtu výsledku, buď aditivní nebo multiplikativní.

b) Analytical Hierarchy process (AHP)

AHP spočívá ve volbě sady alternativ a vytvoření hierarchie hodnotících kritérií. Následně se alternativy porovnávají mezi sebou v párech, podle čehož jsou bodovány. Výběr vah, stejně jako u MAUT, probíhá výhradně ve spolupráci se zadavatelem.

c) Elimination and Choice Expressing the Reality (ELECTRE)

ELECTRE je metoda založená na vyjádření preference. Jednotlivé alternativy jsou porovnávány navzájem. Preference jsou vyjádřeny pomocí základních čtyřech druhů vztahu – indiference, preference, slabá preference a neporovnatelné.

d) Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE)

Metoda PROMETHEE je založena na základě pěti předpokladů: (i) míra rozdílů výkonností dvou subjektů musí být zohledněna; (ii) měřítko kritérií je irelevantní, protože porovnání se provádí na základě párového srovnání; (iii) jsou možné tři případy: preference, indiference a neporovnatelné; (iv) metody by měly být pro rozhodovatele snadno srozumitelné a (v) váhy musí být přidělovány flexibilně. Po identifikaci vah a kritérií jsou alternativy porovnány a dle celkového převyšujícího toku je vyhodnocena jejich hodnota.

7.2.1 Vybraná rozhodovací metoda

Pro výběr alternativ přípravně volím aditivní metodu MAUT. Jedná se o základní přístup, který je velice univerzální a lehce uchopitelný. Podrobně popsal tuto metodu Butler et al. (2001). Každé alternativě je přiřazena hodnota dle rovnice

$$u(X) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(X_i) \quad (7.1)$$

kde $w_i \in < 0, 1 >$ je váha kritéria i z celkového počtu n kritérií (součet těchto vah je roven 1), u_i je hodnota kritériální funkce normovaná na jednotnou stupnici $< 0, 5 >$ jako funkce parametru X_i . Jednoduchost aditivní metody je vykompenzována striktními

požadavky na kritéria. Kritéria musí být na sobě nezávislá a jejich součet musí dát dohromady celkový popis alternativy.

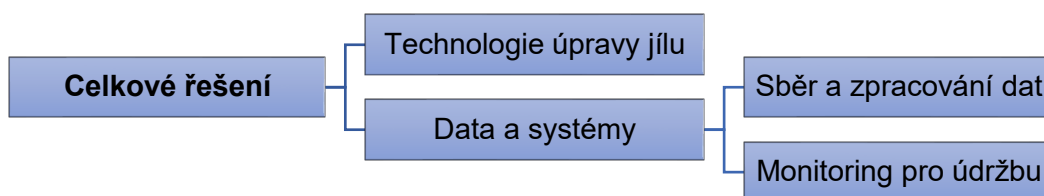


Obrázek 7.2: Postup návrhu řešení

Jednotlivé komponenty na sebe navazují ve výrobním cyklu. Každá provedená volba proto musí sledovat vytvářený koncept, jelikož každou volbou jsou ovlivněny okrajové podmínky následujících voleb. Proces je proto potřeba seřadit do logického sledu dle důležitosti.

7.3 Dekompozice a seřazení komponent

Prvním krokem vybrané rozhodovací metody je rozdělení samotného řešení na základní návrhové segmenty, viz obrázek Obrázek 7.3. Každý segment obsahuje několik dílčích komponent, ze kterých se skládá konečné řešení.



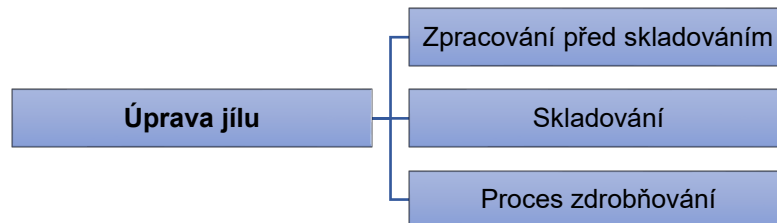
Obrázek 7.3: Dělení návrhu řešení na základní segmenty

Druhým krokem metody je seřadit segmenty tak, jak by měl postupně proběhnout návrh. Zvolenými kritérii řazení jsou význam a rozsah segmentu. Po konzultaci se zástupcem firmy jsou segmenty navrhovány v pořadí:

1. Technologie úpravy jílu
 - a. Zpracování před skladováním
 - b. Skladování
 - c. Zdrobňovací proces
2. Monitoring pro údržbu
 - a. Měření zátěže elektrických pohonů
 - b. Detekce poruch elektrických pohonů
 - c. Predikce poruch technologie
3. Data a systémy
 - a. Přímé měření vlhkosti
 - b. Sběr dat o počasí
 - c. Měření okolních podmínek

7.4 Technologie úpravy jílu

Technologie úpravy jílu je nejdůležitější součástí tohoto návrhu. Kriteriační volba komponent technologie provedená v této kapitole podstatně určuje další vývoj návrhu. Dílčí komponenty jsou zobrazeny na obrázku Obrázek 7.4.



Obrázek 7.4: Struktura návrhu úpravy jílu

Ke každé z komponent bylo vytvořeno několik možných variant návrhu. Tyto varianty vznikaly na základě rešerše dostupných technologií a metod a též na základě konzultace s odborníky z firmy P-D Refractories CZ a.s.

7.4.1 Zpracování před skladováním

Pro určení vhodné varianty zpracování před skladováním posuzují následující kritéria:

Cena – lineární norma, maximální hodnota: 15 000 000,- s nulovým bodovým ziskem, minimální hodnota 0,- s maximálním bodovým ziskem.

Provozní náklady – lineární norma, vliv nákladů na provoz strojů a materiál, body jsou normovány nákladem na nákup jílu a hodnota kritérií vychází z poměrů jednotlivých režii. Cena 1 t jílu je 2000,- a roční spotřeba se pohybuje okolo 10 000 t. Celkový roční náklad na jíl je proto 20 000 000,-.

Velikost zrna při skladování – kvadratická norma (reflektuje průřez nejhrubších zrn); maximální hodnota 100 mm s nulovým ziskem, minimální hodnota 0 mm s maximálním ziskem.

a) Bez předzpracování

Navážený jíl není nijak zpracován před naskladněním. Nákladní auto naveze materiál stávajícího druhu do skladu, kde je dále uspořádáván pomocí manipulační technologie, stejně jako v současném stavu. Nevzniká žádný náklad navíc. Materiál je hrubý a má špatné předpoklady k homogenizaci, stejně jako při současném stavu.

Tabulka 7.1: Skóre varianty bez předzpracování

Hodnota parametru	Bodový zisk
Cena: $p = 0,-$	$B = 5 \left(1 - \frac{p}{15\,000\,000}\right) = 5$
Provozní náklady: základní cena jílu $P=1$, provoz stroje $S=0,-$	$B = 5 - P - \frac{S}{20\,000\,000} = 4$
Velikost zrna při skladování: $H = 100$ mm	$B = 5 - 5 * \left(\frac{H}{100}\right)^2 = 0$

b) Trhač hlín

Materiál je navážen do speciální násypky, odkud je podáván do procesu primárního zdrobnění pomocí trhače hlín, který je popsán v kapitole 2.7.4.1. Dle výběru válcovacího tělesa je možné zdrobnit zrno vstupního materiálu řádově na desítky milimetrů (uvažuji 50 mm), a tím umožnit rychlejší a rozsáhlejší homogenizaci materiálu. Při tomto řešení vzniká náklad na trhačí stroj (odhadem 9 000 000,-) a jeho doplňkovou údržbu a provoz. Pro stroj o výkonu cca 100 kW o produkci 10 t/h s roční produkcí 10 000 t je odhadovaná cena provozu 500 000 Kč.

Tabulka 7.2: Skóre varianty zpracování trhačem

Hodnota parametru	Bodový zisk
Cena: $p = 9\,000\,000,-$	$B = 5 \left(1 - \frac{p}{15\,000\,000}\right) = 2$
Provozní náklady: základní cena jílu $P=1$ Provoz stroje: $S = 500\,000,-/\text{rok}$	$B = 5 - P - \frac{S}{20\,000\,000} = 3,98$
Velikost zrna při skladování: $H = 50$ mm	$B = 5 - 5 * \left(\frac{H}{100}\right)^2 = 3,75$

c) Navážení vysušeného jílu

Navážka sušeného jílu znamená potlačení problému s vlhkostí. Materiál je vysušen a obsahuje zanedbatelné množství volné vlhkosti. Při mísení s ostřivem je tedy množství přidané vody jednoduchou funkcí hmotnosti směsi obou složek v daném poměru. Jíl by v tomto případě byl naskladňován stejně jako v současnosti. Zrno vysušeného materiálu je jemnější, závisí na vnějších podmínkách skladování a přepravy (uvažuji 30 mm). Největší překážkou jsou náklady, které oproti vlhkému jílu dosahují 3x vyšší hodnoty. Proces vysušování jílu je také energeticky náročný, což může způsobit i kolísání ceny.

Tabulka 7.3: Skóre varianty sušeného jílu

Hodnota parametru	Bodový zisk
Cena: 0,-	$B = 5 \left(1 - \frac{0}{5\,000\,000}\right) = 5$
Provozní náklady: cena suchého jílu $P_2 = 3$, provoz stroje $S = 0,-$	$B = 5 - P_2 - S = 2$
Velikost zrna při skladování: 30 mm	$B = 5 - 5 * \left(\frac{30}{100}\right)^2 = 4,55$

Tabulka 7.4: Výsledné skóre všech variant předzpracování

		Parametr:	Cena	Provozní náklady	Velikost zrna při skladování	
		Váha:	0,1	0,45	0,45	Skóre:
Varianta	Bez zpracování		5	4	0	2,30
	Trhač hlín		2	3,98	3,75	3,68
	Vysušený jíl		5	2	4,55	3,45

7.4.2 Skladování

Pro určení vhodné varianty skladování posuzují následující kritéria:

Cena – lineární norma, mezní hodnota: 12 000 000,- s nulovým bodovým ziskem, minimální hodnota 1 000 000,- s maximálním bodovým ziskem.

Stupeň lidského faktoru – hodnota dle nároků na obsluhu; plný bodový zisk pro plně automatizované řešení včetně manipulace, měření a rovnání; body odečteny za nutnost obsluhu (1 bod/1 pracovník).

Možnost trasovat materiál – plný počet bodů (5), pokud lze určit stáří, vlhkost a historická data materiálu k odběru; 3 body za řešení, kde lze odlišit alespoň vlhkost v segmentech skladu; 1 bod za přibližné určení stáří; 0 bodů za nedohledatelné vlastnosti.

Vlhkost skladovaného materiálu – lineární norma; průměrná vlhkost skladovaného materiálu, která musí během skladování homogenizovat; plný počet bodů za 10 % vlhkosti a méně; bez bodů za 20% vlhkosti a více

a) Sezonní naskladňování

Toto řešení skladování vychází z předpokladu, že v letních měsících je jílová hmota nejstabilnější ve svých vlastnostech (vlhkost v průměru 12 %). Spočívá tedy v mobilizování veškerých skladovacích prostor k intenzivní navážce v letním období. Kroky k realizaci takového řešení spočívají v reorganizaci skladu, vytvoření plánu navážky a vyjednání podmínek s dodavatelem, náklad na realizaci uvažují 0,-. Toto

řešení s sebou nese zvýšenou potřebu personálu pro obsluhu manipulační techniky v době intenzivní navážky, uvažují 2 standardně kvalifikované zaměstnance na směnu.

Největším rizikem tohoto řešení je právě dodavatelský řetězec. Roční spotřeba jílu v přípravě se pohybuje okolo 10 000 t. Období stabilních podmínek trvá zhruba 3 měsíce (13 týdnů). Jedno nákladní auto přiveze až 24 t. Podle jednoduchého výpočtu by za 13 týdnů muselo přijet 417 naložených nákladních vozů. Při takovém tempu by denně muselo jezdit 6 až 7 vozů (144 až 168 t) každý pracovní den.

Tabulka 7.5: Hodnocení návrhu sezonního naskladňování

Hodnota parametru	Bodový zisk
Cena: 0,-	$B = 5 * \left(1 - \frac{0}{12\,000\,000}\right) = 5$
Stupeň lidského faktoru: L = 2 (potřeba dvou zaměstnanců)	$B = 5 - L = 3$
Možnost trasování materiálu: T = 3 (částečný odhad vlhkosti materiálu)	$B = T = 3$
Vlhkost skladovaného materiálu: W = 12 %	$B = 5 - (W - 10) * \frac{5}{10} = 4$

b) Hromadný sklad

Myšlenkou tohoto uspořádání skladování je využití celého prostoru skladovacích prostor pro materiálové hospodářství. Stěžejním bodem je proces homogenizace vlhkosti. Předpokladem této metody je předzpracování jílu pro lepší homogenizaci. Materiál by měl být navážen zejména v suchých obdobích a částečně po zbytek roku. Z průměrných 17,2 % vlhkosti by bylo možné díky větší skladovací kapacitě klesnout odhadem na 16 %.

Navážený materiál je uspořádáván pomocí manipulační techniky podle data navážky na kupy. Tím se surovina srovnatelných vlastností nechá odležet najednou, což při zakládání do výroby umožní stabilnější vstupní materiál. V průběhu skladování je materiál rozhrnován nakladačem pro umocnění homogenizačního procesu. Do výroby je odleželý materiál odebírán pomocí korečkového pásu v tenké vrstvě. Důvodem je postupné odebírání oblastí materiálu s podobnými vlastnostmi.

Toto řešení si žádá počáteční investici v podobě nákupu speciálního korečkového rypadla (odhadovaná investice 6 000 000,-). Hospodářství s materiálem ve skladu pro kvalitní odležení je částečně automatizovatelné. Po odladění systému průběžné manipulace a správy materiálu (na základě know-how a experimentu) lze uvažovat, že při procesu výroby bude možné operativně trasovat informace o materiálu s omezenou přesností (4 body). Pro obsluhu skladu postačí 1 pracovník obsluhy.

Tabulka 7.6: Hodnocení návrhu s hromadným skladováním

Hodnota parametru	Bodový zisk
Cena: 6 000 000,-	$B = 5 * \left(1 - \frac{6\,000\,000}{12\,000\,000}\right) = 2,5$
Stupeň lidského faktoru: L = 1 (potřeba jednoho zaměstnance)	$B = 5 - L = 4$
Možnost trasování materiálu: T = 4 (částečný odhad vlhkosti materiálu)	$B = T = 4$
Vlhkost skladovaného materiálu: W = 16 %	$B = 5 - (W - 10) * \frac{5}{10} = 2$

c) Boxy s korečkem pro odebírání dle vlhkosti

Skladování jílu v boxech je řešení inspirované cihlářskými výrobami. Spočívá v navážce a třídění jílu podle vlhkosti do 3 až 4 skladovacích boxů. Navážka, odležení a odběr materiálu z boxů probíhají ve fázích pro udržení systematického přístupu.

Materiál je při navážení dopravován do boxů pomocí dopravníků dle vstupních vlastností várky a fáze výrobního programu. Režim navážky probíhá standardně jako v současném postupu, lze tedy předpokládat průměrnou vlhkost 17,2 %. V boxu leží materiál několik týdnů a je v případě potřeby promícháván pomocí mostového jeřábu nebo jiné manipulační techniky. Odběr materiálu je realizován prostřednictvím seškrabávání spodní vrstvy pomocí speciálních korečků.

Veškeré popsané procesy probíhají automaticky. Veškerá data spojená s materiálem (vlhkost na vstupu, číslo boxu, délka odležení apod.) jsou systémem skladu ukládána do databáze pro pozdější využití ve skladu nebo v návaznosti životního cyklu. Kvůli tomu je tato varianta velice nákladná. Počáteční investice zahrnuje nákup kolejového korečkového rypadla nad skladovacími boxy (5 000 000,-), dopravníků (30 m dopravník s odbočkami pro zakládání, 2x 20 m + 1x 10 m pro dodávku do přípravy, celkem odhadem 1 200 000,-) a dopravníkových uzlů (500 000,-). Celkem tedy odhadem 6 700 000,-.

Tabulka 7.7: Hodnocení návrhu skladovacích boxů

Hodnota parametru	Bodový zisk
Cena: 6 500 000,-	$B = 5 * \left(1 - \frac{6\,500\,000}{12\,000\,000}\right) = 2,29$
Stupeň lidského faktoru: L = 0 (plně automatizované)	$B = 5 - L = 5$
Možnost trasování materiálu: T = 5 (částečný odhad vlhkosti materiálu)	$B = T = 5$
Vlhkost skladovaného materiálu: W = 17,2 %	$B = 5 - (W - 17,2) * \frac{5}{10} = 1,4$

Tabulka 7.8: Výsledné skóre variant typu skladování

Parametr:		Cena	Stupeň lidského faktoru	Možnost trasovat materiál	Vlhkost skladovaného materiálu	Skóre:
Váha:		0,2	0,2	0,3	0,3	
Varianta	Sezonní navážka	5	3	3	4	3,70
	Hromadný sklad	2,5	4	4	2	3,10
	Skladovací boxy	2,29	5	5	1,4	3,38

Nejlepší variantou při volbě varianty skladování byla sezonní navážka.

7.4.3 Proces zdrobňování

Pro určení vhodné varianty úpravy procesu zdrobňování posuzují následující kritéria:

Výkon – lineární norma, alternativy vztaženy k momentálnímu stavu, vyšší výkon odečítá body kvůli vyšší spotřebě

Pořizovací cena – lineární norma, mezní hodnota: 15 000 000,- s nulovým bodovým ziskem, minimální hodnota 0,- s maximálním bodovým ziskem.

Přídavný redukční poměr – kvadratická norma (redukční poměry blízko nejvyšší hodnotě jsou lépe bodovány než v případě lineární normy); nulový přídavný poměr s nulovým bodovým ziskem, hodnota 8 a více s maximálním bodovým ziskem.

Výstupní velikost zrna – lineární norma; maximum bodů za velikost zrna 1 mm a méně; nulový zisk za 4 mm a více

a) Ponechání současného

Současný stav spočívá v drcení jílových zrn pomocí dvou válcových drtičů s hladkými válci. Spotřeba a údržba by proto s touto volbou nijak nevzrostla a nevznikl by žádný náklad ani změna redukčního poměru. Použité válcové drtiče podle analýzy současného stavu jsou náchylné na vysoký nebo nejednotný obsah vlhkosti v jílu. Vzhledem k funkčnosti a opatřením strojů tuto náchylnost hodnotím jako slabou.

Tabulka 7.9: Hodnocení současného stavu zdobňování

Hodnota parametru	Bodový zisk
Výkon: $P = 1$ (2x22 kW + 110 kW)	$B = 5 - P = 4$
Pořizovací cena: $p = 0,-$	$B = 5 \left(1 - \frac{p}{15\,000\,000}\right) = 5$
Přídavný redukční poměr: $R = 0$	$B = -\frac{5}{64}R^2 + \frac{5}{4}R = 0$
Výstupní velikost zrna: $Z = 3$ mm	$B = 5 \left(1 - \frac{Z-1}{4-1}\right) = 1,67$

b) Třetí hladký drtič

Třetí drtič s hladkými válci by měl být umístěn ve výrobním procesu za druhý ze současných drtičů. Mělo by se jednat o drtič o průměru válce 1250 mm o výkonu 1 x 110 kW. Tento stroj má firma k dispozici, proto pořizovací cena spočívá v jeho instalaci, odhadem 250 000,-.

Mezera mezi válci d by měla být odladěna pomocí technologa výroby tak, aby přítlak válců byl optimální (odhadovaný rozsah 1 až 2 mm). Vstupní surovinou tohoto válce je drcený jíl ve formě šupinek o tloušťce zrn maximálně 2-3 mm. Dosažitelný redukční poměr dle této úvahy se pohybuje mezi 2 a 3 (pro analýzu uvedu 3). Výhodou přídavného válcového drtiče je zvýšení pravděpodobnosti redukce hrubých frakcí, které způsobují povrchové i vnitřní vady výpalků.

Tabulka 7.10: Hodnocení přídavného hladkého válcového drtiče

Hodnota parametru	Bodový zisk
Výkon: $P = 1 + 110/154$	$B = 5 - P = 3,29$
Pořizovací cena: $p = 5\,000\,000,-$ (počáteční investice)	$B = 5 \left(1 - \frac{p}{15\,000\,000}\right) = 3,33$
Přídavný redukční poměr: $R = 3$	$B = -\frac{5}{64}R^2 + \frac{5}{4}R = 3,05$
Výstupní velikost zrna: $Z = 1,5$ mm	$B = 5 \left(1 - \frac{Z-1}{4-1}\right) = 4,17$

c) Ozubený válcový drtič

Motivací užití hrubšího sekundárního drtiče je rozmělnění tvrdých jílových aglomerátů, zejména v období mrazu. Takový stroj je vhodné umístit před válcové drtiče, neboť je určen pro drcení s větším zrnem. Podle provedené rešerše by se mohlo jednat o ozubený válcový drtič na jíl a horniny, případně trhač hlín s jemnějšími břity. Odrazové a metací drtiče hornin jsou omezené obsahem vlhkosti a čelistové, kuželové apod. jsou omezené plasticitou suroviny.

Tento robustní stroj by měl dosahovat výkonu kolem 60 kW (uvažuji 60 kW, srovnatelnou operaci momentálně vykonává hladký drtič o výkonu 44 kW). Pořizovací

cena stroje se pohybuje okolo 8 000 000,-. Pro sekundární drtiče obecně platí, že vstupní surovinu redukuje na zrna o minimální velikosti 5 až 20 mm (uvažuji 20 mm vzhledem k plasticitě suroviny). Pro maximální vstupní materiál o velikosti zrna kolem 100 mm se jedná o redukční poměr 5. Nicméně, pokud je již naskladňovaný materiál drcen, tento redukční poměr klesá.

Tabulka 7.11: Skóre přídatného hrubého drtiče

Hodnota parametru	Bodový zisk
Výkon: $P = 1 + 60/154$	$B = 5 - P = 3,61$
Požizovací cena: $p = 8\,000\,000,-$	$B = 5 \left(1 - \frac{p}{15\,000\,000}\right) = 2,33$
Přídavný redukční poměr: $R = 5$	$B = -\frac{5}{64}R^2 + \frac{5}{4}R = 0$
Výstupní velikost zrna: $Z = 3\text{ mm}$	$B = 5 \left(1 - \frac{Z-1}{4-1}\right) = 1,67$

d) Vložení hrubého i hladkého drtiče

Přístup vložení obou zdrobňovacích strojů najednou kombinuje veškeré vlastnosti přístupů b) a c). Hrubá zrna jílu jsou podrcena a nebrání drcení hrubých frakcí na válcových drtičích. Provozní náklady a pořizovací cena logicky vzrostou na částku 14 000 000,-. Redukční poměry jsou charakteristické pro každý stroj a stav suroviny, proto celkový přídavný redukční poměr uvádím jako jejich součet, nikoli součin.

Tabulka 7.12: Hodnocení varianty kombinace přídatného trhače i hladkého drtiče

Hodnota parametru	Bodový zisk
Výkon: $P = 1 + 60/154 + 110/154$	$B = 5 - P = 2,8$
Požizovací cena: $p = 14\,000\,000,-$	$B = 5 \left(1 - \frac{p}{15\,000\,000}\right) = 0,33$
Přídavný redukční poměr: $R = 8$	$B = -\frac{5}{64}R^2 + \frac{5}{4}R = 5$
Výstupní velikost zrna: $Z = 1,5\text{ mm}$	$B = 5 \left(1 - \frac{Z-1}{4-1}\right) = 4,17$

Tabulka 7.13: Výsledné skóre všech variant doplnění zpracovacího procesu

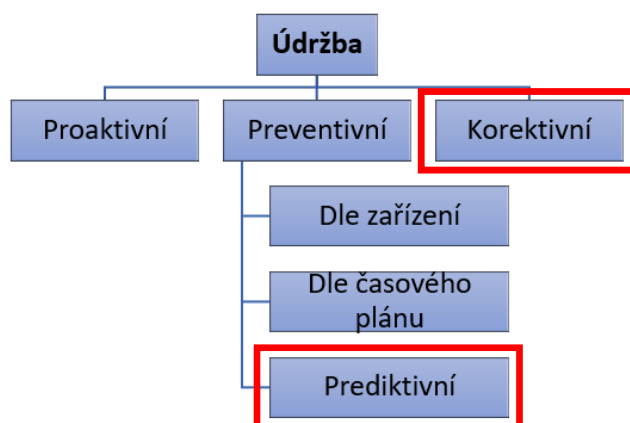
Parametr:		Spotřeba a údržba	Pořizovací cena	Přídavný redukční poměr	Výstupní velikost zrna	Skóre:
Váha:		0,1	0,2	0,25	0,45	
Varianta	Současné	4	5	0	1,67	2,15
	Třetí hladké drticí válce	3,29	3,33	3,05	4,17	3,63
	Vložený trhač hlín	3,61	2,33	4,3	1,67	2,65
	Hladký i hrubý	2,8	0,33	5	4,17	3,47

Nejlepší variantou optimalizace procesu zpracování je přidání jednoho hladkého válcového drtiče.

7.5 Monitoring pro údržbu

Návrh řešení inovace systému údržby se soustředí na typy údržby, které je možné zefektivnit pomocí vhodného sběru a vyhodnocení dat. Jedná se zejména o typy korektivní a prediktivní, viz schéma na obrázku Obrázek 7.5.

Datově založená korektivní údržba detekuje poruchy a potenciálně rizikové stavy monitorovaných strojů a zařízení. Včasná detekce těchto stavů snižuje plýtvání výrobního času díky možnosti rychlé reakce údržby, která poruchy v krátkém čase odstraní. Prediktivní údržba se opírá o dostatek statistických dat z celkového měření výroby. Veškerá popsána měření jsou zaznamenávána v databázi a jsou používána průběžně pro zkvalitnění predikce poruch na různých časových horizontech.



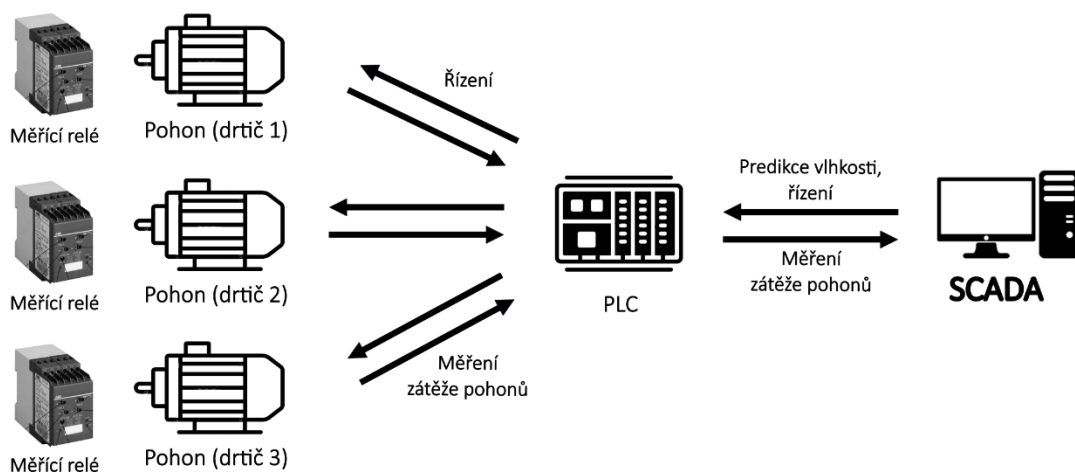
Obrázek 7.5: Cílové typy údržby

Veškeré typy údržby jsou implementovány v řídicím systému SCADA. Pracovníci údržby udržují kontakt se systémem prostřednictvím uživatelského rozhraní.

7.5.1 Měření zátěže pohonů zdrobňovací techniky

Primární motivací měření zátěže pohonů je detekce poruchy mechanických komponent. Měření zátěže pohonů souvisí nejen s poruchovými stavy, ale také s požadovanou přetvárnou energií materiálu. Pokud je zajištěno dostatečně stálé chemické a mineralogické složení, poté tato přetvárná energie souvisí ve velké míře s obsahem vlhkosti a velikostí zrna. Sbíraná data zátěže pohonů při zpracování materiálu s různými stupni vlhkosti mohou posloužit k robustnějšímu modelování jeho stavu.

Měření zátěže strojů je realizováno pomocí monitoringu hodnot proudu, napětí a otáček elektrického pohonu. Měření je realizováno na každém z drtičů v přípravně pomocí elektronických měřicích relé zapojených dle předpisu výrobce do obvodu motoru. Na základě fázových posunů proudu a napětí je vypočten účinník, který je úměrný zátěži motoru. Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny pomocí modelovacího algoritmu, který je implementován v simulačním modulu systému SCADA.



Obrázek 7.6: Schéma systému měření zátěže pohonů drtičů

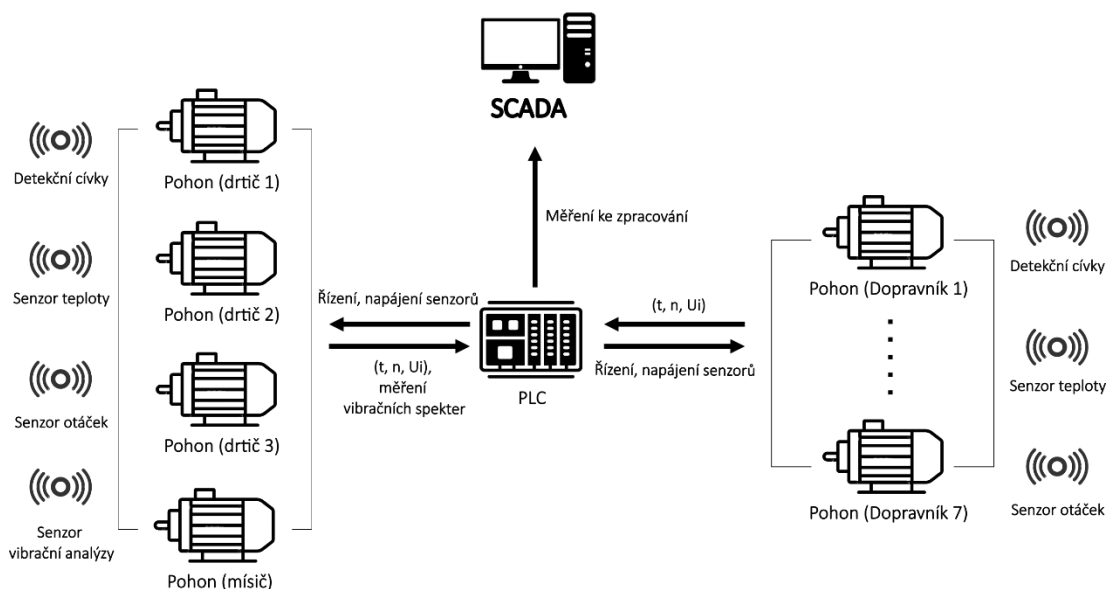
7.5.2 Detekce poruch elektrických pohonů (korektivní údržba)

Poruchy na elektrických pohonech mohou být detekovány pomocí metod popsaných v kapitole **Error! Reference source not found.** Detekce poruch je nejdůležitější pro stěžejní stroje zpracovatelského procesu, tedy válcové drtiče 1, 2 a 3 a mísič směsi. Tyto stroje jsou osazeny:

- Senzory pro měření magnetického pole ve vzduchové mezeře (detekční cívky) dle doporučení technologického standardu ČSN CLC/TS 60034-24
- Senzory pro vibrační analýzu
- Teplotní senzory

d) Otáčkoměry

Vybrané senzory detekují počáteční fáze poruchových stavů mechanického a elektrického rázu. Pro elektrické pohony dopravníků v přípravně je zvolena základní varianta monitorování stavu, a to pouze teplotní senzor a otáčkoměr.



Obrázek 7.7: Schéma datových toků při měření detekce poruchových signálů

Stavy měření budou dostupné v reálném čase obsluze prostřednictvím uživatelského rozhraní buď v mobilní aplikaci nebo v centrálním řídicím systému. Vybraná data jsou zároveň průběžně ukládána pro výstavbu modelu prediktivní údržby.

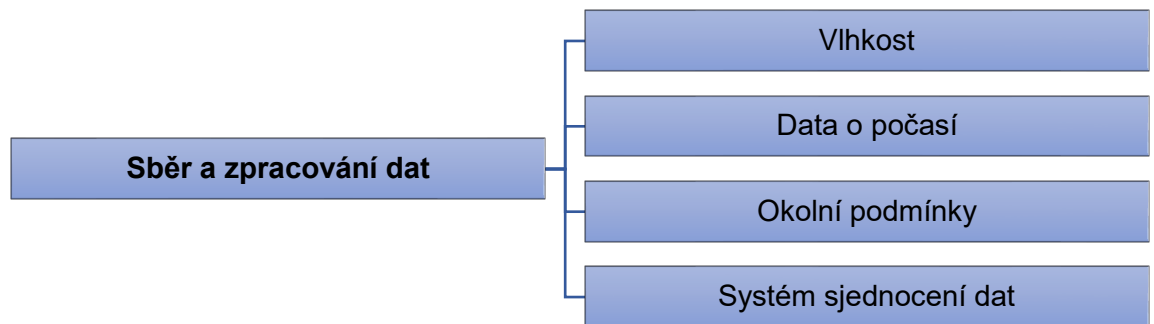
7.5.3 Predikce poruch (prediktivní údržba)

Historické hodnoty měření zátěže, vibrační analýzy, otáček, teplot a poruchových indukčních toků jsou průběžně ukládány. Dostatečně rozsáhlá databáze měření a zachycení poruchových stavů umožní výstavbu datového modelu, který sleduje trendy v naměřených datech vedoucí k poruchám.

V kapitole 4.4.3 jsou popsány jednotlivé fáze implementace prediktivní údržby, tj. tvorba, nasazení a aktualizace. Proces tvorby modelu vyžaduje širokou datovou základnu a řadu experimentů, které nelze obsáhnout v této práci. Významem této práce je směřování ku měření a záznamu stavových veličin technologií. Návazností na toto úsilí je výběr a výstavba konkrétního modelu.

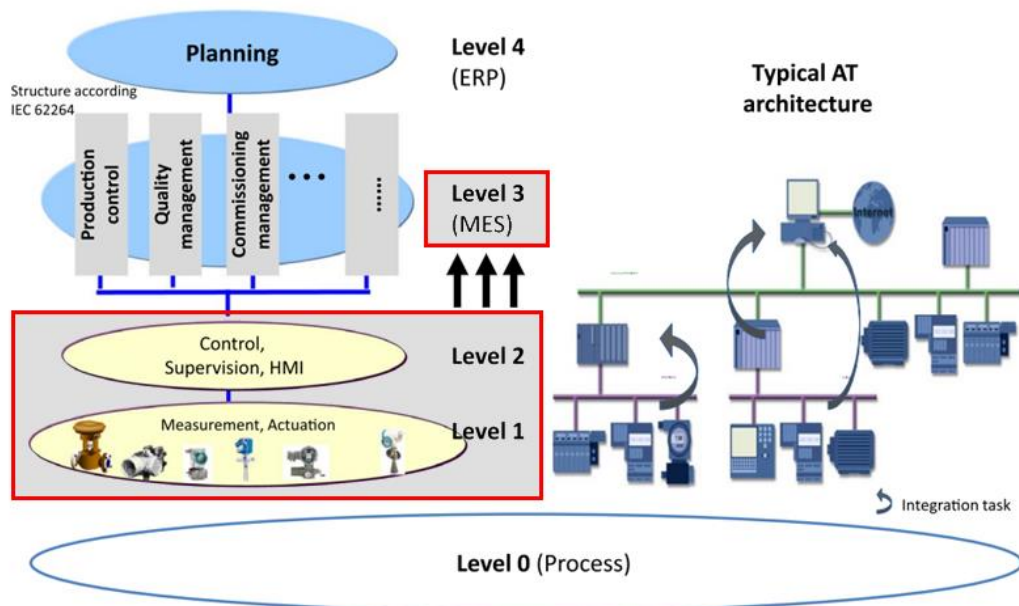
7.6 Data a systémy

Stejně jako technologie úpravy je tato část dekomponována do několika částí, viz obrázek Obrázek 7.8.



Obrázek 7.8: Struktura návrhu dat a systémů

Stěžejním tématem měření materiálových dat a dat okolí je vlhkost jílu. Tato kapitola popisuje sadu navrhovaných komponent sběru dat a jejich zpracování. Na závěr je popsán celkový navrhovaný řídicí systém s prvky Průmyslu 4.0.



Obrázek 7.9: Umístění vlastního řešení ve vertikální struktuře podniku

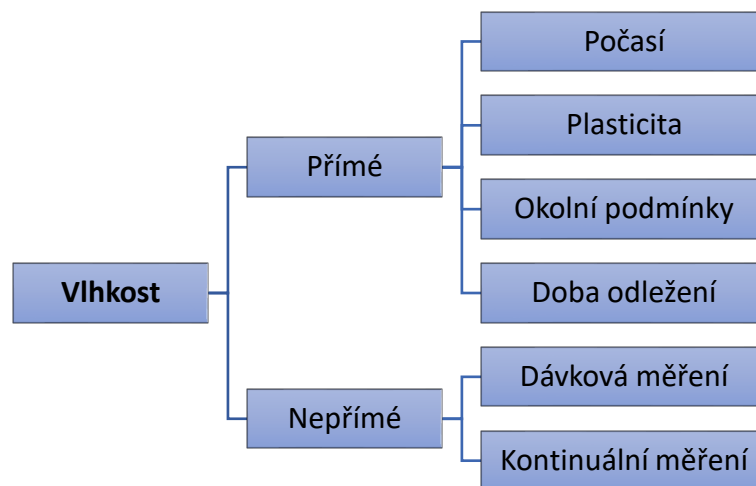
Z hlediska vertikální struktury podniku lze navrhované prvky Průmyslu 4.0 v této práci zařadit převážně do dvou základních pater struktury, tedy výroba a řízení (viz obrázek Obrázek 7.9). Práce přesahuje též do patra MES, převážně díky složkám diagnostiky, údržby nebo databáze sběru dat, které lze použít pro efektivnější plánování.

7.6.1 Vlhkost jako komplexní veličina

Jeden ze základních požadavků na materiál, které nejsou splněny, je vlhkost jílu. Jedná se o parametr, jehož měření vyžaduje robustní přístup. Je nutné připomenout, že měření obsahu vlhkosti již ve firmě probíhala pomocí mikrovlnných senzorů. Nehomogenita jílu však zvyšovala nejistotu měření.

Navrhované řešení vychází z předpokladu, že vlhkost je ovlivněna sérií pozorovatelných veličin, které je možno měřit a vyhodnotit. Z analýzy současného stavu a rešerše vychází, že existuje spjitost vlhkosti jílu s proměnnými níže (měření vlhkosti nepřímá). Návrh řešení v této práci kombinuje měření přímá a nepřímá.

Pro výpočet vlhkosti je použit hybridní prognostický model, viz kapitola **Error! Reference source not found.** Jedná se o model, který kombinuje obecné datové modely a fyzikálně založené, resp. založené na přímém měření. Výpočet vlhkosti probíhá v reálném čase. Nicméně model je nutné před jeho plným nasazením odladit.



Obrázek 7.10: Závislé pro výpočet vlhkosti

a) Počasí

Počasí potažmo roční období je zdroje informací o úhrnech srážek v okolí lomu nebo podél trasy transportu suroviny, venkovní vlhkost vzduchu, která ovlivňuje nasycenost povrchových zemin apod.

b) Plasticita jílu

Dle kapitoly 3.6, která je zaměřena na měření plasticity, je zřejmé, že obsah vlhkosti má přímý vliv na plasticitu. Plasticita ovlivňuje množství energie, které je potřebné pro přetvoření materiálu. Z toho můžeme učinit předpoklad, že zatížení válcových drtičů z části koreluje s vlhkostí drcené suroviny.

c) Okolní podmínky odležení

Relativní vlhkost a teplota okolního prostředí suroviny mají vliv na povrchové vysušování či naopak absorpci vlhkosti. Dle rešerše problematiky mohou tyto podmínky v průběhu jednoho dne změnit obsah vlhkosti materiálu na povrchu téměř o 1 %.

d) Doba odležení

Pokud před skladováním dojde k vhodné úpravě jílu, dochází při odležení k homogenizaci vlhkosti materiálu a dalších parametrů.

7.6.2 Přímé měření vlhkosti

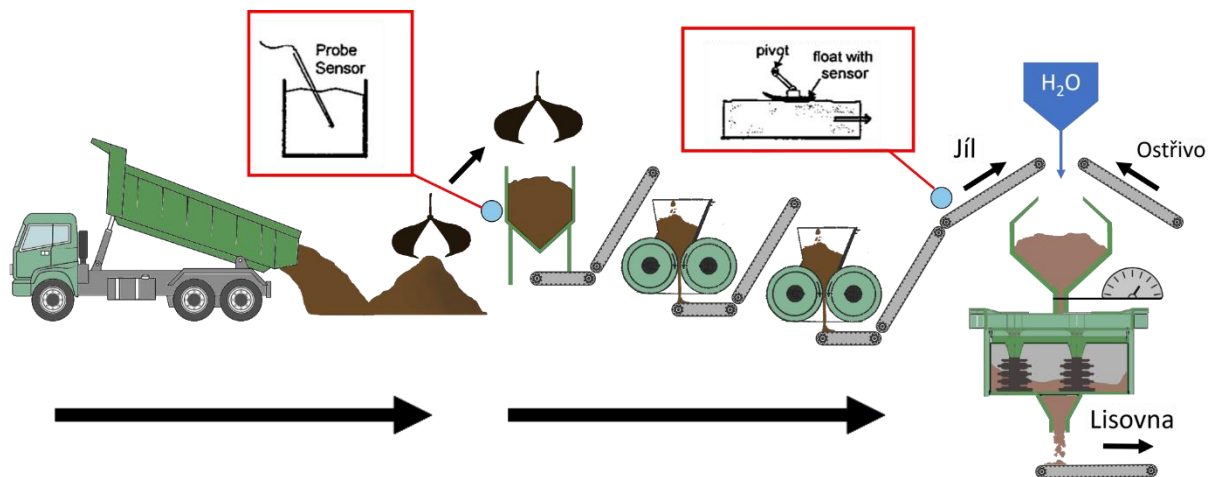
Přímé měření vlhkosti materiálu je nejdůležitější součástí systému pro monitorování vlhkosti. Skládá se z dávkového a kontinuálního měření. Dávkové měření pomocí gravimetrické metody je v podniku již standardem; probíhá laboratorně dle normovaného postupu. Kontinuální měření je realizováno pomocí vhodných senzorů v průběhu výroby.

Základními alternativami kontinuálního měření je měření pomocí mikrovlnného, infračerveného (IR) nebo přibližně infračerveného (NIR) senzoru nebo pomocí refraktometru v časové oblasti (TDR). Požadavky na měření jsou:

Tabulka 7.14: Zhodnocení jednotlivých senzorů pro přímé měření vlhkosti

Požadavek	Mikrovlnný	IR/NIR	TDR
Přesnost a opakovatelnost maximálně 0,1 % hm. obsahu vlhkosti	ANO	ANO	ANO
Frekvence měření alespoň 1 s ⁻¹	ANO	ANO	NE
Robustní vůči obsahu vlhkosti	ANO	ANO	NE
Automatické (bez obsluhy, komunikace s PLC)	ANO	ANO	ANO
Bezpečné (bez ionizujícího záření)	ANO	ANO	ANO
Objemové měření (nikoli povrchové)	ANO	NE	ANO

Všechny požadavky jsou splněny mikrovlnnými senzory, proto volím řešení právě s využitím mikrovlnných senzorů. Výhodou tohoto typu senzoru je rozmanitost aplikací, ve kterých se dodávají (viz Obrázek 3.5).



Obrázek 7.11: Schéma přímého měření vlhkosti jílu

Přímé měření je ovlivněno odchylkami v jakosti materiálu a dalšími faktory. Robustní přístup tohoto měření proto zahrnuje více druhů senzorů nebo měření v různých fázích. V tomto řešení navrhuji přímé měření pomocí dvou mikrovlnných senzorů umístěných dle schématu na obrázku Obrázek 7.11. Data jsou sbírána průběžně, ukládána a vyhodnocována pomocí datové analýzy. Návazností na toto řešení je využití více druhů senzorů dle jejich specifikací.

7.6.3 Sběr dat o počasí

Úhrny srážek a teplota v místě lomu jsou údaje, které jsou v korelaci s jakostí dodávaného materiálu. Tato data neslouží k výpočtu hodnoty vlhkosti, nýbrž k predikci primárního rozložení pravděpodobnosti. Tyto údaje mohou být získány několika způsoby.

- Vlastní měření (v případě zpracovatelské firmy v blízkosti lomu)
- Data od výrobce (dle smluvního standardu)
- Data z meteorologických stanic (dostupná online)

V tomto řešení uvažuji převážně využití dat z meteorologických stanic z důvodu dostupnosti a automatizovatelnosti. Pomocí vhodného internetového klienta lze tato data stahovat a přiřazovat konkrétním dávkám dováženého jílu v rámci podnikové databáze.

7.6.4 Měření okolních podmínek

Okolní podmínky skladování jsou definovány pomocí:

- vlhkosti
- teploty
- tlaku

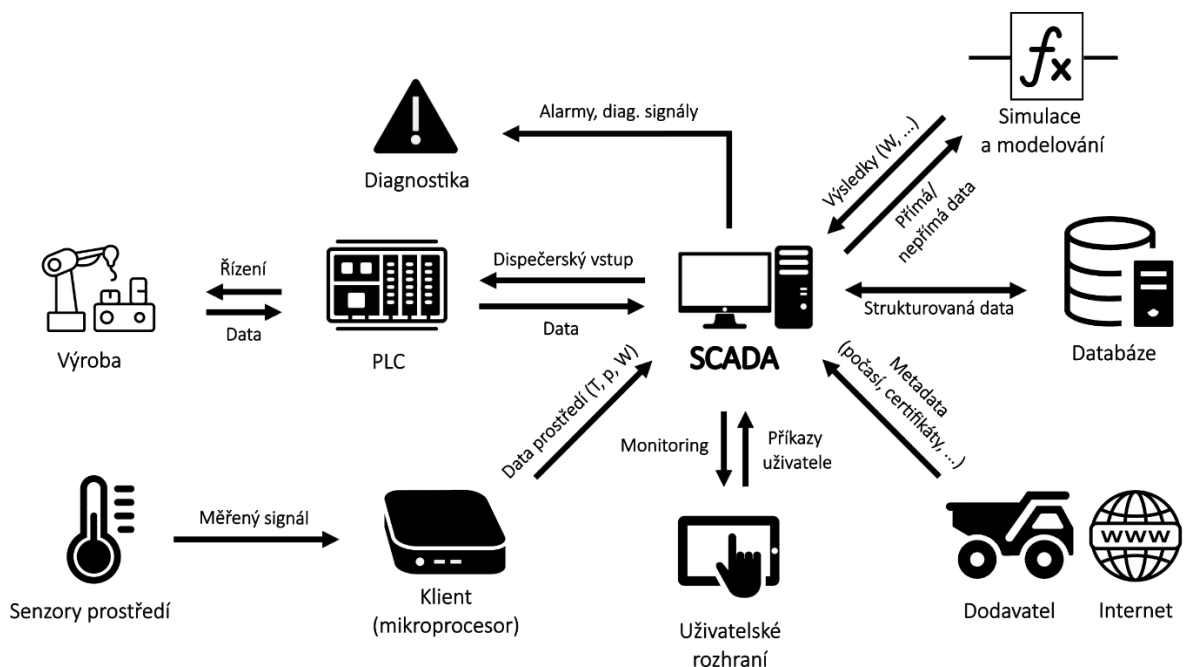
Sběr dat z prostředí skladování materiálu je prováděn pomocí vhodně umístěných senzorů v prostoru skladu. Tyto senzory jsou připojeny k mikroprocesoru, který data v pravidelných cyklech měří a odesílá na podnikový server, kde jsou přiřazena ke konkrétnímu uskladněnému materiálu.

7.6.5 Systém sjednocení a zpracování dat

V rámci cyklu je nyní navržen sběr množství dat, která je třeba vhodně zpracovat a průběžně ukládat na databázový server. Požadavkem návrhu systému sjednocení a sběru dat je možnost trasovat veškerá data spojená s konkrétním skladovaným materiálem nebo technologiemi.

Shromážděvaná data jsou zpracována a využívána různými způsoby.

- modelování stavu materiálu a výpočet pravděpodobné hodnoty vlhkosti (potažmo plasticity nebo velikosti zrna) z historických dat
- přímé měření vlhkosti a vyhodnocení na základě datového kontextu
- regulace přidané vlhkosti
- záznam statistiky zmetkovitosti, datového kontextu, přímého měření a přidané vlhkosti materiálu a výpočet korekcí
- přímá diagnostika výrobní technologie
- výpočetní model predikce poruch na vybraných technologiích



Obrázek 7.12: Schéma navrhovaného systémového uspořádání

Na obrázku Obrázek 7.12 je zobrazeno funkční schéma návrhu. Veškeré vyjmenované datové procesy jsou řízeny systémem SCADA (*Supervisory Control And*

Data Acquisition). SCADA nevykonává konkrétní technologické operace, ale dohlíží, monitoruje případně parametrizuje. Veškeré technologické operace jsou vykonávány řídicími automaty (PLC)

V úvodní fázi životního cyklu materiálu je materiál těžen a dodáván. Při naskladnění systém obdrží od dodavatele informace týkající se jakosti materiálu a dalších parametrů dle dané sémantiky. Zároveň jsou z internetu automaticky pořízeny meteorologické záznamy z místa těžby. Úvodní fázi uzavírá provedení dávkových materiálových testů.

Další fází je skladování. Materiál leží v prostoru určeném systémem skladování tak, aby homogenizoval v přítomnosti jiného materiálu s podobnými vlastnostmi. V průběhu skladování je automaticky měřena teplota, vlhkost a tlak okolí. Výsledky jsou ukládány na databázovém serveru do relace s materiálem, který je naskladněn.

Před odběrem materiálu jsou veškerá uložená data konkrétního materiálu použita pro výpočet jeho pravděpodobné vstupní hodnoty vlhkosti. Při odběru materiálu a operaci drcení proběhne dvakrát přímé měření vlhkosti a také měření zatížení válcových drtičů při provozu. Tato data jsou v reálném čase použita pro modelování stavu vlhkosti materiálu. Průběžný stav vlhkosti je použit jako parametr pro regulaci přidané vody.

Během drcení jsou také přímo monitorovány drtiče a manipulátory systémem pro detekci a predikci poruch popsáním v kapitole 7.5. Tento systém funguje v reálném čase a uživateli nabízí kontrolovat stav výroby pomocí kombinovaného grafického rozhraní. V případě vyhodnocení poruchy systém dokáže upozornit uživatele pomocí SMS zprávy.

7.7 Shrnutí návrhu

Na základě analýzy současného stavu výrobního procesu jílové směsi ve výrobním podniku bylo navrženo řešení, které se skládá z optimalizace návrhu technologie zpracování, skladování sběru dat pro diagnostiku a regulaci výrobních parametrů.

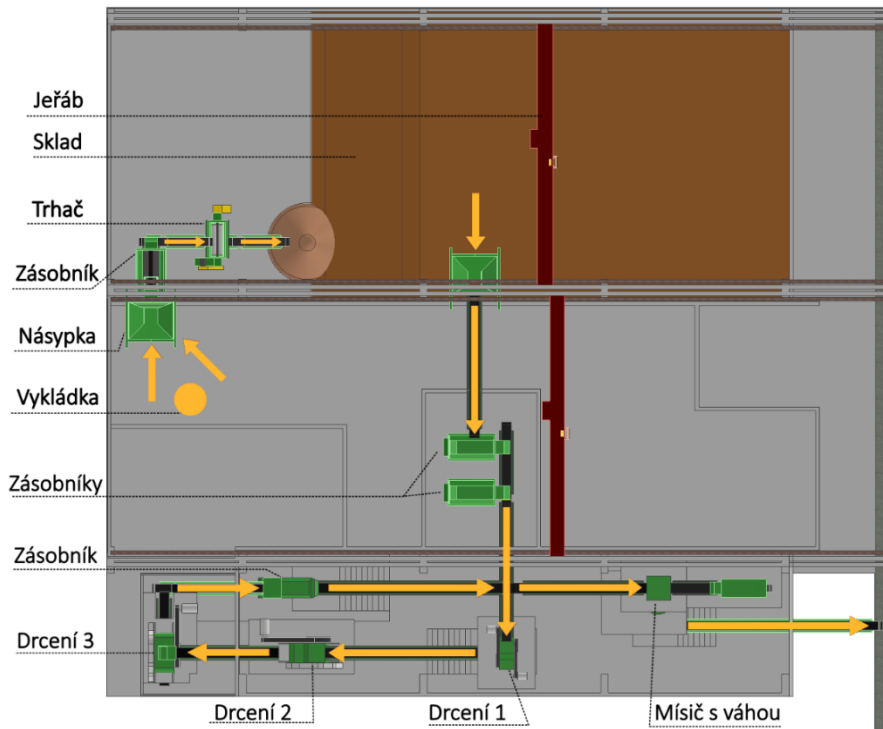
Tabulka 7.15 shrnuje jednotlivé komponenty celkového řešení a shrnuje také vzájemné skóre jednotlivých variant multikriteriální analýzy.

Tabulka 7.15: Shrnutí navrhovaných komponent

Komponenta	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Zpracování před skladováním	Bez předzpracování	Trhač hlín	Nákup nasušeného	-
	2,30	3,68	3,45	-

Skladování	Sezonní navážka	Hromadný sklad	Skladovací boxy	-
	3,70	3,10	3,38	-
Proces zdrobňování	Současný	Přídavný hladký válcový drtič	Přídavný trhač	Přídavný trhač i hladký drtič
	2,15	3,63	2,65	3,47
Měření zátěže pohonů	Měřicí relé na každém ze tří hladkých válcových drtičů. Vyhodnocování v reálném čase. Dostupné v uživatelské aplikaci.			
Detekce poruch el. pohonů	...			
Predikce poruch el. pohonů	...			
Měření vlhkosti (splněných požadavků)	Mikrovlnné	NIR/IR	TDR	
	5/5	4/5	3/5	
Sběr dat o počasí	Záznam meteorologických dat dostupných na internetu a vybraná data od dodavatele			
Měření okolních podmínek	Měření teploty tlaku a vlhkosti pomocí tří sad čidel umístěných ve skladu. Data ukládána do databáze pomocí síťového klienta.			
Sjednocení datových toků	Systém SCADA. Propojení řízení výroby, datových klientů, PLC, dodavatele, internetových zdrojů, simulačních modelů, databáze.			

Na obrázku Obrázek 7.12 je zobrazeno uspořádání navrhovaného řešení s vyznačeným materiálovým tokem.



Obrázek 7.13: Schéma výrobního procesu navrhovaného řešení

Celkové řešení nyní může být zhodnoceno z technického a ekonomického hlediska.

8 Technicko-ekonomické hodnocení

Řešení popsané v předchozí kapitole je výsledkem multikriteriální analýzy, jejíž cílem bylo vybrat optimální variantu z pohledu požadavků podniku. Toto řešení reaguje na problémy výroby, jimiž jsou především nestálá hodnota vlhkosti, velikost zrna a obsah hrubých frakcí výstupního materiálu. Vedle materiálových vlastností monitoruje také stav strojů pro efektivnější korektivní údržbu a operativní plánování údržby pro maximalizaci využitelnosti zdrojů.

a) Rozptyl vlhkost směsi

Směs jílu s ostřivem, která se vyrábí v přípravně, je přepravována do lisovny. Zde je vytlačována pomocí extrudéru na trubkový polotovar. Plasticita směsi musí být velmi stálá pro optimální proces. Plasticita závisí ve velké míře na vlhkosti. Zamezení kolísání vlhkosti je předpokladem pro úbytek zmetků nevypálených výrobků (trhliny po extruzi, nízká soudržnost apod.) i pálených polotovarů (praskliny, nízká pevnost).

Navrhovaný systém spočívá ve víceparametrovém monitorování materiálu pro robustní určení vlhkosti vstupního materiálu. Výhodou řešení je, že nezávisí na měření pouze jednoho senzoru či pracovníka obsluhy, ale skládá se z celkového obrazu životního cyklu materiálu. Rozptyl měření vlhkosti tohoto systému by měl zajistit pokles rozptylu vlhkosti až na 0,05 %, a tím redukovat zmetkovitost výroby.

b) Velikost zrna

Velikost zrn, která jsou dopravena do extruderu přímo ovlivňuje kvalitu extrudovaných produktů. Jílová zrna mohou obsahovat různé množství vlhkosti nebo ostřiva, což způsobuje lokální nehomogenity a nárůst zmetků pálených i nevypálených. Tento problém je řešen přídatnými technologiemi. Před naskladněním jsou podrceny největší jílová zrna pomocí trhače hlín a v přípravně směsi figuruje přídatný hladký válcový drtič. Celkové zvýšení redukčního poměru vede k velikosti částic výstupního materiálu do 1 mm.

c) Celkový obsah hrubých frakcí

Obsah hrubých frakcí znamená obsah tvrdých částic o velikosti 1 mm a více. Hrubé frakce způsobují vady zejména u pálených výrobků, např. deformace, vměstky, trhliny apod. Důvodem jsou zejména objemové a hmotnostní změny při výpalu jílu, kterým tvrdé horniny nepodléhají. Přídatným drtičem s hladkými válci o mezeře mezi válci 1 mm je obsah hrubých frakcí dle zkušeností firmy snížen až na 0,1 % ze současných 1,57 %.

d) Monitoring pro údržbu

V současné době během přípravy jílové směsi v přípravně neprobíhá žádné měření nebo monitorování stavu technologie. V případě poruch nebo jiných nečekaných odstávek musí údržba rychle reagovat. Monitoring výroby dokáže zefektivnit proces upozornění na havarijný stav díky uživatelského rozhraní. Sledování poruchových trendů v monitorovaných stavech umožňuje poruchové stavy i předvídat, čímž je posílena flexibilita údržby a eliminován čas neplánovaných odstávek díky včasnému zásahu-

Tabulka 8.1: Očekávaná změna parametrů vyráběné směsi

Vlastnost	Současná hodnota	Nová hodnota
Rozptyl vlhkosti	0,49 %	0,05 %
Velikost zrna	2-3 mm	1 mm
Hrubé frakce (nad 1 mm)	1,57 %	0,1 %

Veškeré nutné investice spojené s navrhovaným řešením jsou uvedeny v tabulce Tabulka 8.2. Celkové náklady činí 12 737 000,-. Momentální zmetkovitost ve výrobě se pohybuje na hranici 3 % u vypálených a 5 % u nevypálených výrobků. Celkově odhadovaný pokles zmetkovitosti při realizaci popsaného řešení je z 3 % na 1 % u nevypálených a z 5 % na 1 % u vypálených výrobků.

Výrobní náklady vypálených výrobků jsou 10 000,-/t. Jelikož nevypálené zmetky byly vyřazeny ještě před pecí, jsou jejich výrobní náklady nižší, a to 6 000,-/t. Díky informaci o výrobních nákladech lze vypočítat celkovou roční úsporu vlastního řešení jako ušetřený podíl nákladů na zmetky obou druhů při výrobě 15 000 t/rok.

$$\text{celková roční úspora} = (\Delta Zm_{PÁL} \cdot Nákl_{PÁL} + \Delta Zm_{NEV} \cdot Nákl_{NEV}) \cdot \text{Objem výroby}$$

$$\text{celková roční úspora} = ((0,03 - 0,01) \cdot 10\,000 + (0,05 - 0,01) \cdot 6\,000) \cdot 15\,000$$

$$\text{celková roční úspora} = 6\,600\,000, -/\text{rok}$$

Důležitým ekonomickým ukazatelem pro navrhované řešení je doba návratnosti, která je určena jako podíl počáteční investice a celkové roční úspory.

$$\text{doba návratnosti} = \frac{\text{počáteční investice}}{\text{celkové roční úspory}} = \frac{12\,737\,000}{6\,600\,000} = 1,93 \text{ roku}$$

Tabulka 8.2 Kalkulace počáteční investice

	Položka	Počet	Cena za kus	Cena položky
Zpracovatelský proces Zpracování před skladováním	Podavač	1	1 200 000,-	1 200 000,-
	Dopravníky k trhači hlín (2x 5 m)	2	80 000,-	60 000,-
	Trhač hlín	1	6 000 000,-	6 000 000,-
Zpracovatelský proces Skladování	Dopravník k zásobníku výroby (10 m)	1	120 000,-	120 000,-
	Násypka k dopravníku	1	100 000,-	100 000,-
	Stavební úpravy	1	500 000,-	500 000,-
Zpracovatelský proces Zdrobňování	Mechanická úprava drtiče 2	1	100 000,-	100 000,-
	Dopravník k drtiči 3 (2x cca 5 m)	2	80 000,-	160 000,-
	Válcový drtič s hladkými válci	1	3 000 000,-	3 000 000,-
Monitoring pro údržbu	Monitorovací relé zátěže	4	30 000,-	120 000,-
	Spektrální senzory vibrační analýzy (drtiče a mísič)	4	10 000,-	40 000,-
	Detekční cívky napětí ve vzduchové mezeře	11	5 000,-	55 000,-
	Otáčkoměry	11	2 500,-	27 500,-
	Teplotní senzory	11x 2	2000,-	44 000,-
	Kabeláž	1	100 000,-	100 000
	Periferie sběrnic	1	100 000,-	100 000,-
Data a Systémy Sensorika	Mikrovlnné senzory	2	10 000,-	20 000
	Senzory teploty	3	1 500,-	4 500,-
	Senzor tlaku	1	1 000,-	1 000
	Senzor vlhkosti	3	3 000,-	9 000,-
Data a systémy HW a SW	SCADA software	1	500 000,-	500 000,-
	Databázový server	1	100 000,-	100 000,-
	Výpočetní jednotka	1	50 000,-	50 000,-
	PLC	1	100 000,-	100 000,-
	Mikroprocesor pro měření	3	2 000,-	6 000,-
	Uživatelská aplikace	1	100 000,-	100 000
	Kabeláž a Periferie	1	120 000,-	120 000
Celkem:				12 737 000,-

9 Závěr

Hlavním cílem práce bylo navrhnout optimalizaci technologického procesu výroby jílové směsi. Návrh optimalizace proběhl na základě důkladné analýzy stavu výroby po technologické stránce, dále z pohledu sběru dat, systémového zajištění výroby a rovněž byly zohledněny ekonomické aspekty.

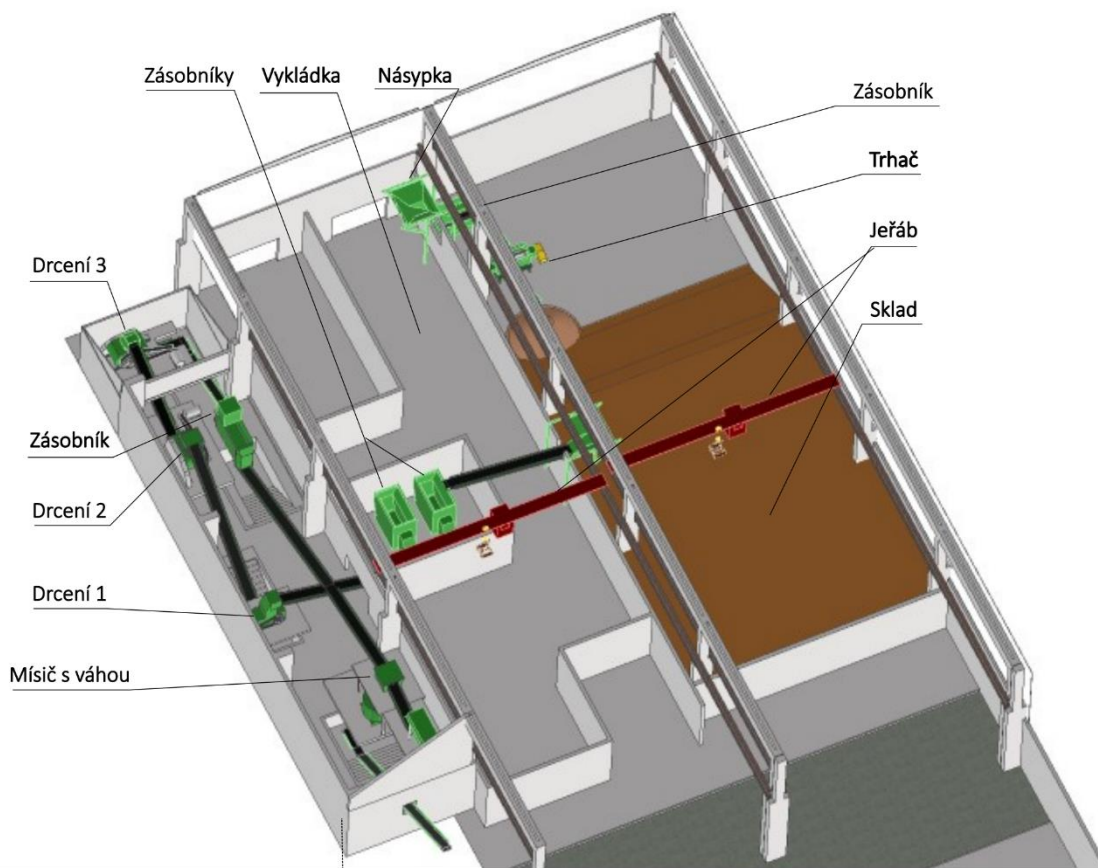
Část 1 této práce je věnována jílu jako materiálu. Je zde popsán jeho původ, dělení a základní parametry charakteristické pro zpracování. V navazující části 2 jsou rozebrány jednotlivé kroky zpracování materiálu a popsána technologie, která se v daných krocích používá. Důležitou epizodou této části jsou metody zdobňování materiálu a mísení. Část 3 se soustředí na měřicí techniku, která doprovází proces zpracování jílu. Nejen měření materiálových parametrů, ale také měření a detekce poruchových signálů strojů bylo později využito pro tvorbu vlastního řešení. Část 4 se zabývá systémovým řízením a automatizací. Důležitou součástí je popis principů Průmyslu 4.0, které jsou posléze také zakomponovány ve vlastním řešení.

V části 5 byla představena firma P-D Refractories CZ a.s., se kterou jsem na diplomové práci spolupracoval a ověřoval si své poznatky v praxi.

V navazující části 6 uvedena analýza současného stavu výrobní linky na komínové roury v této firmě. Analýza byla zaměřena na konkrétní produkt, výrobní materiál, technologický proces a analýzu z pohledu Průmyslu 4.0.

Na základě analýzy současného stavu výroby byl v kapitole 7 vytvořen vlastní návrh optimalizace této výrobní linky. První částí návrhu bylo zpracování před skladováním. Při uskladnění jílu lze dosáhnout jeho větší výsledné homogenity, pokud je uskladňován v dostatečně jemném stavu. Z toho důvodu byla zvolena varianta instalace trhače hlín ve skladových prostorách. Následným krokem bylo uskladňování jílu. Podle zvolené strategie skladování jílu bude materiál pro celkovou roční spotřebu navážen pouze v suchém letním období pro minimalizaci vlhkosti.

Navazující návrh se týká zpracovatelského procesu výroby. Do přípravný navrhuji umístit dodatečný válcový drtič s hladkými válci, který upraví velikost zrna na průměr 1 mm (viz „drcení 3“ na obrázku Obrázek 9.1)



Obrázek 9.1: Finální 3D model návrhu řešení

Pro zefektivnění údržby byly navrženy systémy monitorování strojů. Byla navržena instalace senzorů, které budou nově monitorovat vybrané parametry strojů – zátěž pohonů, vibrace ložisek, teplotu a otáčky. Aktuální hodnoty parametrů budou online k dispozici v centrálním řídicím systému a v mobilní aplikaci. Rovněž bude možné parametry hodnotit za libovolné minulé období za účelem vývoje funkčního modelu prediktivní údržby.

Závěrečným návrhovým blokem bylo měření dat charakterizujících uskladněný materiál a systém pro komplexní přehled dat. Součástí návrhu je přímé měření vlhkosti jílu dvěma mikrovlnnými senzory umístěnými v zásobníku a na páse. Nepřímá měření sledují zátěž drtičů, údaje o počasí v těžební lokalitě, klimatické podmínky při skladování aj. Pomocí nepřímých dat je udržována konstantní predikce vlhkosti zpracovávaného materiálu. Veškeré toky zahrnující komunikace s PLC, řízení simulace a databáze jsou sjednocovány pomocí systému SCADA.

Tímto návrhem byl cíl diplomové práce splněn. Návrh z této diplomové práce bude pravděpodobně realizován v průběhu roku 2023. Dle poznatků z praxe bude je počítáno s dalšími optimalizačními kroky.

Seznam použité literatury

ANDREWS, Anthony, Joseph ADAM a Simon K.Y. GAWU, 2013. Development of fireclay aluminosilicate refractory from lithomargic clay deposits. *Ceramics International* [online]. **39**(1), 779–783 [vid. 2022-10-29]. ISSN 02728842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2012.06.091

BAJER, Jiří NOVOTNÝ a Czesław RUDY, 2013. Příprava žáruvzdorných materiálů. **2013**.

BANGEMANN, Thomas, Matthias RIEDL, Mario THRON a Christian DIEDRICH, 2016. Integration of Classical Components Into Industrial Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the IEEE* [online]. **104**(5), 947–959 [vid. 2022-12-13]. ISSN 0018-9219, 1558-2256. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2015.2510981

BUTLER, John, Douglas J. MORRICE a Peter W. MULLARKEY, 2001. A Multiple Attribute Utility Theory Approach to Ranking and Selection. *Management science* [online]. **47**(6), 800–816. ISSN 0025-1909. Dostupné z: doi:10.1287/mnsc.47.6.800.9812

CERQUITELLI, Tania, Nikolaos NIKOLAKIS, Lia MORRA, Andrea BELLAGARDA, Matteo ORLANDO, Riku SALOKANGAS, Olli SAARELA, Jani HIETALA, Petri KAARMILA a Enrico MACII, 2021. Data-Driven Predictive Maintenance: A Methodology Primer. In: Tania CERQUITELLI, Nikolaos NIKOLAKIS, Niamh O'MAHONY, Enrico MACII, Massimo IPPOLITO a Sotirios MAKRIS, ed. *Predictive Maintenance in Smart Factories* [online]. Singapore: Springer Singapore, Information Fusion and Data Science, s. 39–73 [vid. 2023-01-28]. ISBN 9789811629396. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-16-2940-2_3

CINELLI, Marco, Stuart R. COLES a Kerry KIRWAN, 2014. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological indicators* [online]. **46**(Journal Article), 138–148. ISSN 1470-160X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolind.2014.06.011

DAVIES, C.E., S.J. TALLON a N. BROWN, 2005. Continuous Monitoring of Bulk Density and Particle Size in Flowable Powders and Grains. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. **83**(7), 782–787 [vid. 2023-01-07]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1205/cherd.04325

DE OLIVEIRA MODESTO, Cláudio a Adriano Michael BERNARDIN, 2008. Determination of clay plasticity: Indentation method versus Pfefferkorn method. *Applied Clay Science* [online]. **40**(1–4), 15–19 [vid. 2023-01-08]. ISSN 01691317. Dostupné z: doi:10.1016/j.clay.2007.06.007

DIBOWSKI, Henrik, Joern PLOENNIGS a Martin WOLLSCHLAEGER, 2018. Semantic Device and System Modeling for Automation Systems and Sensor Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* [online]. **14**(4), 1298–1311 [vid. 2022-12-20]. ISSN 1551-3203, 1941-0050. Dostupné z: doi:10.1109/TII.2018.2796861

FITYUS, Stephen, Tony WELLS a Wenxiong HUANG, 2011. Water Content Measurement in Expansive Soils Using the Neutron Probe. *Geotechnical testing journal*. **34**(3), 1–10.

GALIN, I. A. a V. K. DONIS, 2014. Calibration of Continuous Conveyor-Type Weighers Using Reference Weights Without Stoppage of the Production Process. *Measurement*

Techniques [online]. **57**(8), 884–890 [vid. 2023-01-07]. ISSN 0543-1972, 1573-8906. Dostupné z: doi:10.1007/s11018-014-0554-5

HAMZA, A, I KOCSEK, R GÉBER a A BUZIMOV, 2019. Plasticity of Red Mud and Clay Mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. **613**(1), 012051 [vid. 2023-01-08]. ISSN 1757-8981, 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/613/1/012051

HIRSCH-KREINSEN, Hartmut, 2016. Digitization of industrial work: development paths and prospects. *Journal for Labour Market Research* [online]. **49**(1), 1–14 [vid. 2023-01-26]. ISSN 1614-3485, 1867-8343. Dostupné z: doi:10.1007/s12651-016-0200-6

HOLČAPEK, Michal, 2022. Nukleární magnetická rezonanční (NMR) spektrometrie, EPR spektrometrie. In: *Molekulová spektrometrie*. Univerzita Pardubice.

LEELAMANIE, Dal, 2011. Changes in Soil Water Content with Ambient Relative Humidity in Relation to the Organic Matter and Clay. *Tropical Agricultural Research and Extension* [online]. **13**(1), 6 [vid. 2023-01-25]. ISSN 1391-3646. Dostupné z: doi:10.4038/tare.v13i1.3130

LOSEV, S. A., 1965. The operation of clay grinding machines in refractories plants. *Refractories* [online]. **6**(1–2), 58–60 [vid. 2022-10-30]. ISSN 0034-3102, 1573-9139. Dostupné z: doi:10.1007/BF01284591

MACHADO, Carolina a J. Paulo DAVIM, ed., 2020. *Industry 4.0: challenges, trends, and solutions in management and engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group. Manufacturing design and technology. ISBN 978-1-351-13297-8.

MOBILIAN, Courtney a Christopher B. CRAFT, 2022. Wetland Soils: Physical and Chemical Properties and Biogeochemical Processes. In: *Encyclopedia of Inland Waters* [online]. B.m.: Elsevier, s. 157–168 [vid. 2022-11-15]. ISBN 978-0-12-822041-2. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-819166-8.00049-9

MOBLEY, R. Keith, 2002. Impact of Maintenance. In: *An Introduction to Predictive Maintenance* [online]. B.m.: Elsevier, s. 1–22 [vid. 2023-01-27]. ISBN 978-0-7506-7531-4. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-7506-7531-4/50001-4

PÁN, Miroslav a Václav JUKL, 1985. *Stroje a zařízení*. Praha: SNTL.

ŘEPKA, Vlastimil, 1998. *Technologie zpracování surovin*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-7078-548-5.

STARÝ, Jaromír, Jakub JIRÁSEK, František PTICEN, Jan ZAHRADNÍK a Martin SIVEK, 2021. Review of production, reserves, and processing of clays (including bentonite) in the Czech Republic. *Applied Clay Science* [online]. **205**, 106049 [vid. 2022-10-14]. ISSN 01691317. Dostupné z: doi:10.1016/j.clay.2021.106049

SUSHA LEKSHMI, S.U., D.N. SINGH a Maryam SHOJAEI BAGHINI, 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* [online]. **54**, 92–105 [vid. 2023-01-06]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2014.04.007

ŠEBOR, Gustav, 1983. *Těžba a úprava nerostných surovin*. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického.

- TAN, Xiaoling, Liming HU, Allen H. REED, Yoko FURUKAWA a Guoping ZHANG, 2014. Flocculation and particle size analysis of expansive clay sediments affected by biological, chemical, and hydrodynamic factors. *Ocean Dynamics* [online]. **64**(1), 143–157 [vid. 2022-12-12]. ISSN 1616-7341, 1616-7228. Dostupné z: doi:10.1007/s10236-013-0664-7
- TIAB, Djebbar a Erle C. DONALDSON, 2012. *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Gulf Professional Pub. ISBN 978-0-12-383848-3.
- VAIDYA, Saurabh, Prashant AMBAD a Santosh BHOSLE, 2018. Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing* [online]. **20**, 233–238 [vid. 2022-12-30]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2018.02.034
- WANG, P., 2000. *Assessment of Moisture Measurement Techniques for Ceramic Processing*. 1. srpen 2000. B.m.: NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- WILLS, Barry A. a James E. FINCH, 2016. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Eighth edition. Amsterdam Boston, Mass Heidelberg: Elsevier. ISBN 978-0-08-097053-0.
- YUDIN, A. V., S. Ya. DAVYDOV, R. A. APAKASHEV a V. S. SHESTAKOV, 2020. Improvement of the Technology of Preparation of Clay Raw Materials for the Production of Refractories. *Refractories and Industrial Ceramics* [online]. **60**(5), 426–429 [vid. 2022-11-25]. ISSN 1083-4877, 1573-9139. Dostupné z: doi:10.1007/s11148-020-00380-9
- ZHANG, Junhui, Qingping JIANG, Yuqing ZHANG, Liangliang DAI a Houxuan WU, 2015. Nondestructive Measurement of Water Content and Moisture Migration of Unsaturated Red Clays in South China. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. **2015**, 1–7 [vid. 2022-11-03]. ISSN 1687-8434, 1687-8442. Dostupné z: doi:10.1155/2015/542538

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Druhy zemin dle zrnitosti (Řepka 1998).....	15
Tabulka 2.1: Historická klasifikace mechanického zdrobňování (Šebor 1983) ...	32
Tabulka 2.2: Maximální rozměr kamenů drcených hladkým válcovým drtičem ve vztahu s redukčním poměrem (Wills a Finch 2016)	40
Tabulka 3.1: Přehled materiálových zkoušek a měření jílu	50
Tabulka 6.1: Parametry vstupního materiálu	87
Tabulka 6.2: Parametry výstupního materiálu přípravy	90
Tabulka 6.3: Specifikace drtičů	93
Tabulka 6.4: Shrnutí požadavků na proces zpracování	99
Tabulka 7.1: Skóre varianty bez předzpracování	104
Tabulka 7.2: Skóre varianty zpracování trhačem	104
Tabulka 7.3: Skóre varianty sušeného jílu	105
Tabulka 7.4: Výsledné skóre všech variant předzpracování	105
Tabulka 7.5: Hodnocení návrhu sezonního naskladňování	106
Tabulka 7.6: Hodnocení návrhu s hromadným skladováním.....	107
Tabulka 7.7: Hodnocení návrhu skladovacích boxů.....	107
Tabulka 7.8: Výsledné skóre variant typu skladování.....	108
Tabulka 7.9: Hodnocení současného stavu zdrobňování	109
Tabulka 7.10: Hodnocení přídatného hladkého válcového drtiče	109
Tabulka 7.11: Skóre přídatného hrubého drtiče	110
Tabulka 7.12: Hodnocení varianty kombinace přídatného trhače i hladkého drtiče	110
.....	110
Tabulka 7.13: Výsledné skóre všech variant doplnění zpracovacího procesu ...	110
Tabulka 7.14: Zhodnocení jednotlivých senzorů pro přímé měření vlhkosti	116
Tabulka 7.15: Shrnutí navrhovaných komponent	119
Tabulka 8.1: Očekávaná změna parametrů vyráběné směsi	123
Tabulka 8.2 Kalkulace počáteční investice	124

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Jílový lom	11
Obrázek 1.2: Klasifikace jílu dle technologických vlastností.....	13
Obrázek 1.3: Klasifikace jílu obsahu ostřiv a taviv	14
Obrázek 1.4: Trojúhelníkový diagram pro zařazení zemin dle zrnitosti (Mobilier a Craft 2022).....	16
Obrázek 2.1: Dělení způsobů zdrobňování	25
Obrázek 2.2: Roztřídění třídičů dle principu procesu (ČSN 72 9301)	27
Obrázek 2.3: Rozhodující faktory při výběru technologie zdrobňování materiálu (Šebor 1983)	32
Obrázek 2.4: (a) Otevřený cyklus (b) Uzavřený cyklus (Wills a Finch 2016)	33
Obrázek 2.5: Potrubí pro tepelné médium v drtiči na jíl: 1. Přívod plynu 2. Přívod vzduchu (Losev 1965)	34
Obrázek 2.6: Zubový dvouválcový drtič (Wills a Finch 2016)	36
Obrázek 2.7: Nožový dvourotorový trhač TNV.....	37
Obrázek 2.8: Přehled druhů drtičů hornin.....	38
Obrázek 2.9: Válcový drtič (Wills a Finch 2016).....	39
Obrázek 2.10: Rozklad sil na částici při drcení válcovým drtičem	40
Obrázek 2.11: Válcové a odrazové drtiče (Šebor 1983)	41
Obrázek 2.12: Kompresní válcový drtič (Wills a Finch 2016)	42
Obrázek 2.13: Bubnový mlýn MBM (Pán a Jukl 1985)	44
Obrázek 2.14: Vířivý mísič s otočnou mísou a) se skloněnou osou otáčení b) se svislou osou otáčení (Bajer et al. 2013).....	47
Obrázek 2.15: Systém přípravy formovací směsi (Bajer et al. 2013)	47
Obrázek 2.16: Schéma fluidní sušičky, 1 – dávkovací zásobník, 2 – topeniště, 3 - fluidní přepážka I, 4 – sušicí komora, 5 - fluidní přepážka II, 6 – chladicí komora, 7 – cyklony, 8 - výsyp suchého a ochlazeného materiálu (Bajer et al. 2013)	49
Obrázek 3.1: Váhy s ohřevem pro měření vlhkosti pomocí gravimetrické metody	52
Obrázek 3.2: Schéma kapacitního senzoru vlhkosti.....	53
Obrázek 3.3: Schéma zapojení sondy pro TDR měření vlhkosti (Susha Lekshmi et al. 2014).....	54
Obrázek 3.4: Schéma obousměrného mikrovlnného měřicího systému.....	55
Obrázek 3.5: Typické aplikace mikrovlnných rezonančních senzorů vlhkosti.....	56
Obrázek 3.6: Schéma zapojení měřicího obvodu NMR (Wang 2000)	57

Obrázek 3.7: Výsledek měření NMR, vzorky zahřáté na 105 °C	59
Obrázek 3.8: Zobrazení vibračních módů molekuly vody (Wang 2000)	59
Obrázek 3.9: Schéma měření pomocí IR (nebo NIR) spektrometru (Wang 2000)	60
Obrázek 3.10: Schéma neutronové sondy (Fityus et al. 2011)	62
Obrázek 3.11: Dvoukanálová dopravníková váha (Galín a Donis 2014)	63
Obrázek 3.12: Schéma experimentálního setupu pro měření objemové hustoty materiálu (Davies et al. 2005).....	65
Obrázek 3.13: Keramické žároměrky (zdroj).....	66
Obrázek 3.14: a) Příliš suchý vzorek b) Příliš vlhký vzorek (de Oliveira Modesto a Bernardin 2008).....	67
Obrázek 3.15: Analytický síťovací přístroj AS 200 firmy Retsch	69
Obrázek 3.16: Laserový částicový analyzátor Cilas® 1190.....	70
Obrázek 3.17: (a) Schéma akustického senzoru zrnitosti (b) Fotografie instalace senzorů (Davies et al. 2005).....	71
Obrázek 3.18: Rozdělení důležitých magnetických polí ve vzduchové mezeře....	71
Obrázek 4.1: Základní pilíře Průmyslu 4.0 (Vaidya et al. 2018)	74
Obrázek 4.2: Schéma automatizovaného výrobního systému (Bangemann et al. 2016)	79
Obrázek 4.3: Porovnání datových a a-priori modelů.....	81
Obrázek 4.4: Funkční schéma hybridního modelu (Cerquitelli et al. 2021).....	81
Obrázek 4.5: Základní typy údržby (Mobley 2002)	82
Obrázek 4.6: Znázornění vhodné preventivní údržby	83
Obrázek 5.1: Výrobní závod P-D Refractories CZ a.s. Svitavy	85
Obrázek 6.1: 3D model současného stavu.....	86
Obrázek 6.2: Komínová vložka	87
Obrázek 6.3: Schéma analýzy současného stavu materiálu.....	87
Obrázek 6.4: Uskladněný surový materiál	89
Obrázek 6.5: Schéma výrobního řetězce	91
Obrázek 6.6: Současný výrobní proces	92
Obrázek 6.7: Bezpečnostní vypínač při přestřižení plechu	93
Obrázek 6.8: Drcený materiál v bufferu před mísičem	94
Obrázek 6.9: Mostový jeřáb nad skladovacím boxem	95
Obrázek 6.10: a) Pásový dopravník b) Segmentový dopravník	95
Obrázek 6.11: Schéma současných datových zdrojů	96
Obrázek 6.12: Zvolené komponenty Průmyslu 4.0.....	97

Obrázek 6.13: Analýza výrobního procesu z pohledu Průmyslu 4.0	98
Obrázek 7.1: Postup vlastního návrhu	100
Obrázek 7.2: Postup návrhu řešení	102
Obrázek 7.3: Dělení návrhu řešení na základní segmenty	102
Obrázek 7.4: Struktura návrhu úpravy jílu	103
Obrázek 7.5: Cílové typy údržby	111
Obrázek 7.6: Schéma systému měření zátěže pohonů drtičů.....	112
Obrázek 7.7: Schéma datových toků při měření detekce poruchových signálů .	113
Obrázek 7.9: Struktura návrhu dat a systémů	114
Obrázek 7.9: Umístění vlastního řešení ve vertikální struktuře podniku	114
Obrázek 7.10: Závislé pro výpočet vlhkosti.....	115
Obrázek 7.11: Schéma přímého měření vlhkosti jílu	117
Obrázek 7.13: Schéma navrhovaného systémového uspořádání.....	118
Obrázek 7.13: Schéma výrobního procesu navrhovaného řešení.....	121
Obrázek 9.1: Finální 3D model návrhu řešení	127