

UNIwersYTET GDAŃSKI
WYDZIAŁ CHEMII
KATEDRA TECHNOLOGII ŚRODOWISKA



Podstawy aparatury chemicznej
Rozdrabnianie surowców w młynie kulowym

dr inż. Paweł Mazierski
Gdańsk 2024

1. Część teoretyczna

1.1. Rozdrabnianie ciał stałych

Rozdrabnianie ciał stałych jest procesem energochłonnym i niezbędnym w wielu gałęziach przemysłu, począwszy od wydobywczego aż po spożywczy i farmaceutyczny. Stopień rozdrabniania surowców (substratów) stałych wpływa na szybkość i wydajność wielu procesów technologicznych, a także na jakość produktu końcowego. Ogólnym celem rozdrabniania ciał stałych jest uzyskanie danego materiału o odpowiednim rozmiarze ziarna (tzw. uziarnienie). Analiza procesu rozdrabniania ciał stałych opiera się na ustaleniu zależności pomiędzy składem ziarnowym produktów rozdrabniania, fizycznymi właściwościami materiału, energią rozdrabniania i parametrami maszyn rozdrabniających.

Można wyodrębnić dwa główne cele rozdrabniania:

- a. **przygotowanie substratów do reakcji chemicznych** (faza wstępna): stopień rozdrobnienia ma wpływ na szybkość rozpuszczenia substancji oraz efektywność mieszania (np. zawiesin), co przekłada się na wydajność całego procesu;
- b. **nadanie postaci produktowi** (faza końcowa): stopień rozdrobnienia ma wpływ na szybkość suszenia (rozdrabnianie substancji „mokrej”), odważanie, pakowanie bardzo istotne są też wymagania odbiorcy, farmakopei, itp.

Stopień rozdrabniania (n) definiowany jest jako stosunek średnicy ziarna przed rozdrabnianiem (D) do średnicy ziarna po rozdrobnieniu (d):

$$n = \frac{D}{d}$$

W zależności od tego współczynnika rozróżnia się cztery rodzaje rozdrabniania:

- a. wstępne ($n < 5$);
- b. średnie (n w przedziale 5-10);
- c. Drobne (n w przedziale 10-50);
- d. oraz bardzo drobne ($n > 50$).

Procesy rozdrabniania wymagają dużego nakładu energii i dlatego też należą do czynności kosztownych. Zwykle procesy te prowadzi się do pewnego, określonego stopnia rozdrabniania oraz stosując rozsądnie dobrane maszyny. Teoria Rittingera mówi o tym, że ilość energii która jest potrzebna do rozdrabniania ciał stałych jest wprost proporcjonalna do stopnia rozdrabniania

(słuszna przy rozdrabnianiu ziaren o małej średnicy stosując siły w postaci ścierania). Natomiast teoria Kicka głosi, że ilość energii dostarczonej do procesy rozdrabniania jest wprost proporcjonalna do zmniejszania objętości ziaren rozdrabnianych i ich wytrzymałości na ściskanie (słuszna dla wstępnego rozdrabniania dużych ziaren). Teoria Bonda jest uogólnieniem wymienionych teorii i zakłada ona, że energia rozdrabniania jest proporcjonalna do średnicy rozdrabnianych ziaren w potęgę d^2 . Energia dostarczona do rozdrabniarki jest zawsze większa niż wynika to z obliczeń według wymienionych teorii. Efekty bezwładności i straty tarcia w rozdrabniarkach wymagają o wiele większej energii do wytworzenia nowej powierzchni. Rozdrabniarki są maszynami o bardzo małej sprawności energetycznej, która dodatkowo maleje wraz ze stopniem rozdrabniania materiału

Fizykomechaniczny opis rozdrabniania można przedstawić w następujący sposób:

$$E_r = \Delta E_n + \Delta E_p + \Delta E_{inne}$$

$$E_r \approx 1,23 \cdot G^2 \cdot \frac{d^3}{E}$$

$$E_r \approx \gamma \cdot \Delta S$$

gdzie:

E_r - energia rozdrabniania

G - naprężenie w momencie rozrywania ziarna

d – średnica ziarna

S - powierzchnia ziarna

γ - energia powierzchniowa ziarna

E - moduł Younga, σ/ϵ , Pa

ΔE_n - energia tworzenia naprężeń

ΔE_p - energia na utworzenie nowej powierzchni (~5-10%)

ΔE_{inne} - hałas, ciepło, itd.

Rozdrabnianie w zależności od wartości stopnia rozdrobnienia można podzielić na kruszenie oraz mielenie. Szczegółowy podział został przedstawiony w Tabeli 1.

Tabela 1. Podział rozdrabniania w zależności od stopnia rozdrobnienia

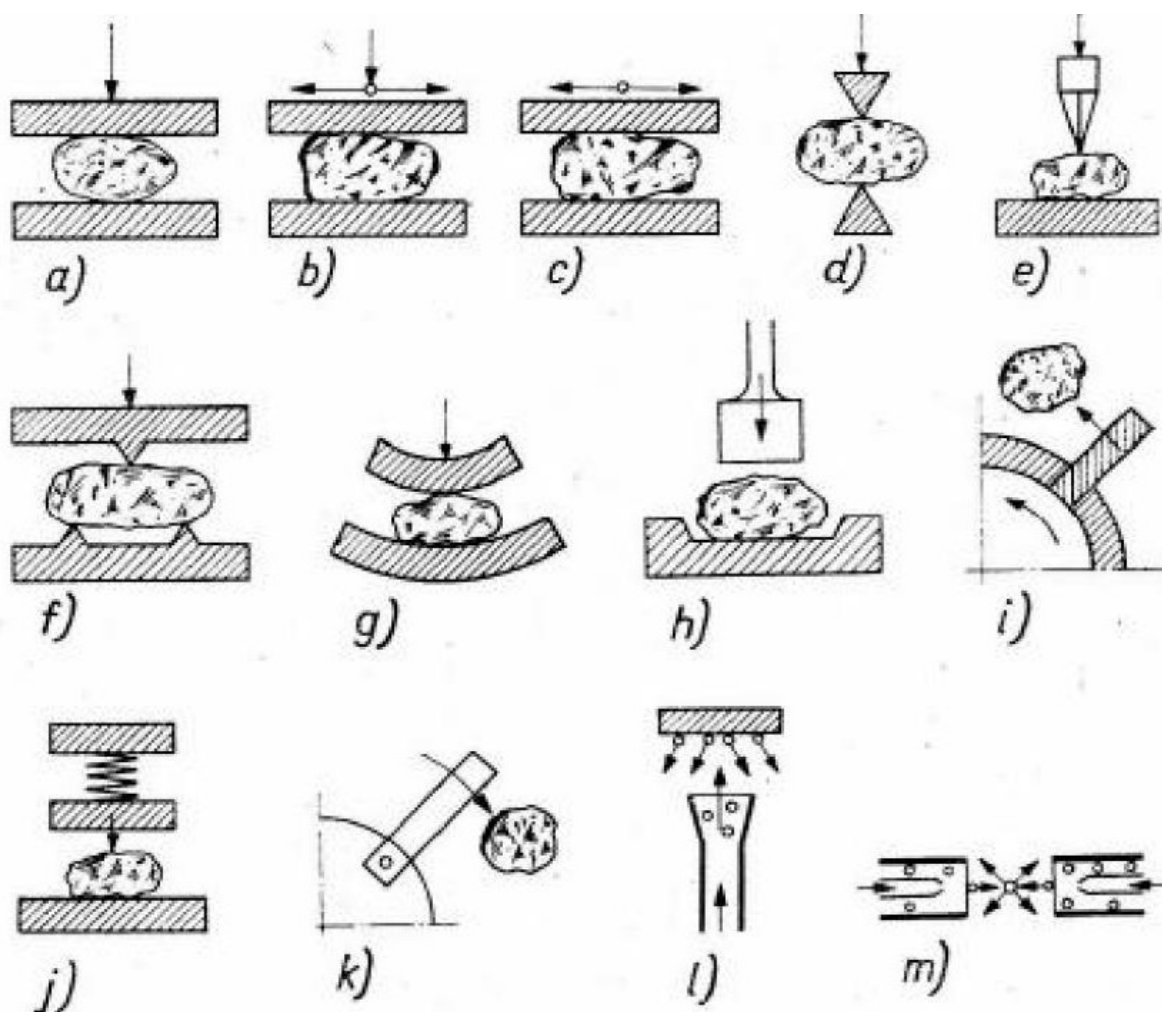
Rodzaj rozdrabniania	Stopień rozdrobnienia	Wielkość kawałków surowca [mm]	Wielkość ziaren produktu
Kruszenie			
wstępne	3 - 6	1500 – 200	> 50 mm
średnie	4 - 10	250 - 50	5 – 50 mm
Mielenie			
drobne	8 – 25	50 – 5	0,5 – 5 mm
bardzo drobne	10 – 50	5 – 1	50 – 500 μ m

ultradrobne	50 – 100	1 – 0,2	50 – 100 μm
koloidalne	> 100	0,2 – 0,1	< 5 μm

Przedstawiony podział ma charakter ogólny i jest przydatny w klasyfikacji i doborze maszyn rozdrabniających. Rozdrabnianie ciał stałych nie jest możliwe od bardzo dużych brył do bardzo drobnych w jednej rozdrabniarce. Zatem rozdrabnianie musi być prowadzone etapami, zgodnie z wymienionymi stopniami rozdrabniania. Rozdrabnianie może być prowadzone okresowo lub w sposób ciągły. Rozdrabnianie ciągłe jest stosowane dla dużych strumieni mas materiałów. Jest ono bardziej ekonomiczne i zapewnia lepszą kontrolę produktu rozdrabniania na skutek jednoczesnej klasyfikacji ziaren produktu. Rozdrabnianie może być prowadzone na sucho lub na mokro, gdy udział cieczy, zwykle wody, jest taki, że surowiec stanowi zawiesinę lub szlam.

1.2. Sposoby rozdrabniania ciał stałych

Rozdrabnianie może prowadzić na dwa sposoby tj. na drodze mechanicznej oraz chemicznej. Przy rozdrabnianiu mechanicznym wykorzystywane są różnego rodzaju siły (Rysunek 1).



Rysunek 1. Sposoby rozdrabniania: a) zgniatanie, b) nacisk, ścieranie, c) ścieranie, d) ścinanie, e) rozłupywanie, f, g) łamanie, h, i) uderzanie, j, k) uder sprężysty, l) kruszenie strumieniowe o płytę kruszącą, m) kruszenie

strumieniowe bez mechanicznych elementów roboczych, wzajemne zderzenie się ziaren

Rozdrabnianie mechaniczne można prowadzić przy wykorzystaniu sił zewnętrznych i sił specjalnych. Siły zewnętrzne obejmują:

- a. zgniatanie;
- b. łamanie;
- c. ścieranie;
- d. łupanie;
- e. ścianie;
- f. miażdżenie;
- g. inne.

Do sił specjalnych należą:

- a. szok termiczny;
- b. zmiana ciśnienia;
- c. bombardowanie cząstkami lub fotonami;
- d. inne.

Rozdrabnianie chemiczne prowadzi się tylko siłami chemicznymi, takimi jak:

- a. roztwarzanie;
- b. rozpuszczanie
- c. spalanie;
- d. bioługowanie;
- e. inne.

1.3. Maszyny do rozdrabniania ciał stałych

Jak już wspomniano rozdrabnianie można podzielić na **kruszenie lub mielenie**, a maszyny w których te procesy się odbywają nazywane są kruszarkami i młynami.

Do kruszarek zalicza się:

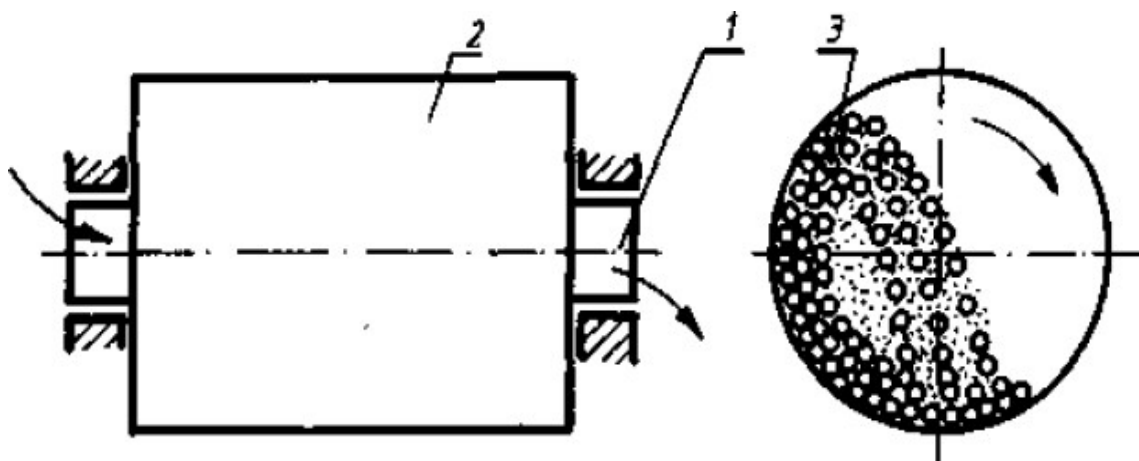
- a. łamacze szczękowe;
- b. łamacze stożkowe;
- c. kruszarki walcowe;
- d. kruszarki młotkowe;
- e. kruszarki nożowe;

- f. kruszarki udarowo – prętowe;
- g. kruszarki rolkowe.

Wśród młynów wyróżnia się:

- a. młyny kulowe;
- b. młyny pierścieniowo-rolkowe;
- c. młyny wibracyjne;
- d. młyny uderzeniowo – strumieniowe (spiralne, pętlicowe (pierścieniowe), uderzeniowe, zderzeniowe oraz fluidalne);
- e. młyny koloidalne (stożkowe, tarczowe, turbinowe).

Młyny kulowe (Rysunek 2) należą do najczęściej używanych urządzeń do mielenia, wykorzystywanych zarówno w małych laboratoriach, jak i w przemyśle, gdzie średnica młynów może sięgać kilku metrów. Mogą pracować w trybie **okresowym lub ciągłym**. Proces mielenia odbywa się dzięki zjawiskom zgniatania, ścinania, uderzania oraz ścierania. Najwyższą efektywność działania uzyskuje się przy prędkości obrotowej młyna wynoszącej $n = (0,65—0,80)$ gdy kulki mielące swobodnie opadają, intensyfikując proces rozdrabniania. W przypadku młynów pracujących w trybie ciągłym, materiał jest dostarczany do bębna poprzez wydrążony wał. Obrót bębna jest realizowany za pomocą przekładni zębatej, która przenosi napęd przez wieniec zębaty umieszczony na bębnie. Wewnątrz młyna, po stronie wylotowej, zazwyczaj znajduje się przegroda separująca, która przepuszcza odpowiednio rozdrobniony materiał do wylotu. Stopień wypełnienia bębna kulami wynosi 20-50%.



Rysunek 2. Schemat młyna kulowego: 1 — czopy drążone, 2 — bęben, 3 — kule

Wyróżnia się następujące typy młynów kulowych:

- a. bębnowy;

- b. stożkowy;
- c. rurowy.

W zależności od kształtu bębna młyny bębnowe dzielą się:

- a. na cylindryczne krótkie i długie (rurowe);
- b. cylindryczno-stożkowe.

W młynach krótkich stosunek długości bębna do średnicy nie przekracza 2, kule mają jednakową średnicę, tym mniejsze im mniejsze są ziarna surowca. W przypadku młynów rurowych długich, stosunek długości do średnicy wynosi 3-6, rozdrabnianie zachodzi stopniowo w kolejnych przestrzeniach, zawierających kule o coraz mniejszej średnicy, rozdzielonych perforowanymi przegrodami. W młynach cylindrycznych stożkowych materiał podawany jest do krótszej części stożkowej o kącie rozwarcia 120° i odprowadzany jako produkt z dłuższej części o kącie 60° . Bęben wypełniony jest kulami o różnej średnicy, które grupują się tak, że duże znajdują się w części cylindrycznej, małe zaś w wydłużonej części stożkowej.

Wyróżnia się pięć stanów zachowania się wypełnienia:

- a. poślizg;
- b. toczenie;
- c. kaskadowanie;
- d. kataraktowanie;
- e. wirowanie.

Wady mielenia w młynach kulowych:

- a. ścieranie się kul i płyt wewnętrznych młyna: kule o średnicy 2,5-15 cm zużywają się w proporcji 2,5-1,5 kg/t produktu. Ubytek liczby kul uzupełnia się raz na dobę 1-4 kule;
- b. zużycie wykładzin wykonanych ze stali stopowych, żeliwa itp. wynosi 0,05-0,25 kg/t produktu. Ochronę przed wycieraniem stanowią wykładziny gumowe, poliuretanowe lub ceramiczne;
- c. wadę młynów kulowych stanowi też duże zużycie mocy, rzędu 250-400 kW/t produktu.
- d. mielenie może być prowadzone również na mokro, co zapobiega zapyleniu środowiska, lecz separacja cząstek ze szlamu i ich suszenie jest wadą tego sposobu.

1.4. Analiza sitowa

Analiza sitowa jest techniką badawczą, która polega na rozdzieleniu materiału (surowców, produktów) na frakcje zawierające ziarna o różnej wielkości, poprzez przesiewanie przez

zestaw sit (Rysunek 3), w wyniku czego ziarna o odpowiednich średnicach pozostają na kolejnych sitach (o coraz mniejszych oczkach). Wykonuje się ją po zakończeniu procesu rozdrabniania. Analiza sitowa polega na przesianiu otrzymanego materiału przez sita o określonej wielkości oczek, ułożonych w kolejności największe oczka na górze, najmniejsze na dole. Powoduje to rozdział materiału na poszczególne frakcje, co jednocześnie umożliwia określenie efektywności rozdrabniania poprzez wagowe i procentowe określenie ilości danych frakcji. Materiał, który przechodzi przez oczka sita, nazywa się przesiewem, natomiast ten, który pozostaje na sicie, to odsiew. Typowe wymiary oczek sit kwadratowych wynoszą: 40, 25, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,25 oraz 0,1 mm dla większych ziaren, takich jak kruszywa, kamienie czy żwir. Dla drobniejszych materiałów, takich jak mączka kwarcowa czy pyły, stosuje się sita o oczkach 0,071 lub 0,063 mm, choć można je zastąpić sitami o oczkach 0,074 i 0,06 mm. W różnych dziedzinach przemysłu i nauki używane są sita o różnych wymiarach oczek.



Rysunek 3. Sita o różnych prześwicie

Najczęściej używane sita to:

- metalowe blachy o grubości od 3 do 12 mm z otworami kwadratowymi lub okrągłymi, które są wiercone lub tłoczone;
- sita druciane z otworami kwadratowymi, wykonane ze stali, miedzi lub innych metali;
- sita plecione z tworzyw sztucznych lub jedwabiu.

Analizę sitową można przeprowadzać dwiema metodami:

- **na sucho**, która jest najczęściej stosowana dla materiałów sypkich, takich jak sorbenty,

kruszywa bez zanieczyszczeń gliną;

- **na mokro**, stosowaną w przypadku materiałów zawierających grudki gliny lub drobne pyły, które trudno oddzielić metodą suchą, zwłaszcza gdy ziarna mają średnicę poniżej 50 µm.

Charakterystyka sit obejmuje:

- **współczynnik prześwitu**: jest to stosunek łącznej powierzchni otworów sita do jego całkowitej powierzchni;
- **przesiewalność sita**: ilość materiału przesiewanego przez sito w jednostce czasu, przypadająca na jednostkę powierzchni sita;
- **sprawność sita**: stosunek masy przesiewu do całkowitej masy materiału poddanego przesiewaniu, obliczany zgodnie z równaniem:

$$\eta = \frac{G_1}{G \cdot \frac{a}{100}} = \frac{100 \cdot G_1}{a \cdot G} [\%]$$

gdzie:

a – procentowa zawartość frakcji w materiale,

G₁ – masa przesiewu [kg],

G – całkowita masa materiału [kg].

- **Współczynnik sprawności przesiewania** (lub **współczynnik niedosiewu**, ε): definiuje ilość materiału, który teoretycznie mógłby przejść przez sito, ale pozostaje w odsiewie, co jest istotne w kontekście przemysłowym. Obliczany zgodnie ze wzorem:

$$\varepsilon = 1 - \eta$$

- **Numer sita**: liczba oczek przypadających na 1 cm długości sita;
- **Liczba "mesh"**: liczba oczek sita na jednym calu długości (około 25,4 mm).

Wynik analizy sitowej można przedstawić na kilka sposobów:

- a. **Tabela wyników analizy**: zestawienie w formie tabeli, w której przedstawia się:
 - rozmiar oczek sita (mm);
 - masa materiału pozostającego na każdym sicie (odsiew) [g lub %];
 - masa przesiewu (materiału, który przeszedł przez dane sito) [g lub %].
- b. **Krzywa przesiewu (krzywa granulometryczna)**: graficzne przedstawienie wyników, gdzie na osi X umieszcza się rozmiar oczek sita (w skali logarytmicznej), a na osi

Y skumulowaną zawartość procentową przesiewu lub odsiewu. Krzywa przesiewu pokazuje rozkład wielkości ziaren w badanym materiale;

- c. **Wykres histogramu:** wykres słupkowy, na którym na osi X znajduje się rozmiar oczek sita, a na osi Y masa pozostała na każdym sicie w procentach. Wykres ten pozwala wizualnie ocenić, jaka część materiału jest zatrzymywana na poszczególnych sitach;
- d. **Analiza procentowa frakcji:** Przedstawienie w procentach, ile materiału należy do poszczególnych frakcji, np. gruboziarnistej, średnioziarnistej, drobnoziarnistej, co pozwala na ocenę dominującego typu cząstek w próbce.

Każdy z tych sposobów ułatwia interpretację wyników oraz ocenę rozkładu wielkości ziaren w przesiewanym materiale. Przykładowy tabelaryczny sposób przedstawiania wyników został przedstawiony w Tabeli 3.

Tabela 2. Przykładowy, tabelaryczny sposób przedstawienia wyników analizy sitowych

Rozmiar oczek sita (mm)	Masa na sicie (g)	Masa na sicie (%)	Przesiew (%)
2,0	50	10	90
1,0	100	20	70
0,5	150	30	40
0,25	200	40	0

2. Literatura

1. Błasiński H., Młodziński B., Aparatura przemysłu chemicznego, WNT 1983.
2. Bieszk H., Urządzenia do realizacji procesów cieplnych w technologii chemicznej, Wyd. PG. 2010.
3. Bieszk H., Urządzenia do realizacji procesów mechanicznych w technologii chemicznej, Wyd. PG. 2001.
4. Pikoń J., Aparatura chemiczna, PWN 1978.
5. Warych J., Aparatura Chemiczna i Procesowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004.

3. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczeń laboratoryjnych jest zapoznanie się z metodyką rozdrabniania materiałów oraz późniejszej klasyfikacji poszczególnych frakcji za pomocą analizy sitowej. Zakres ćwiczenia obejmuje:

- a. mielenie węgla aktywnego, sit molekularnych oraz keramzytu w młynie kulowym w zależności od szybkości obrotów bębna i czasu mielenia;
- b. oraz wykonanie analizy sitowej (klasyfikacja frakcji).

4. Wykonanie ćwiczenia

Sposób postępowania podczas wykonywania ćwiczeń laboratoryjnych obejmuje:

- a. zmierzenie średnicy ziaren węgla aktywnego, sit molekularnych i keramzytu;
- b. odważenie węgla aktywnego, sit molekularnych i keramzytu (3 porcje po x gramów);
- c. węgiel aktywny, sita molekularne i keramzyt rozdrobnić w młynie kulowym (przy trzech prędkościach obrotów bębna i trzech różnych czasach);
- d. zebrać każdą porcję zmielonego węgla aktywnego, sit molekularnych i keramzytu i ponownie zważyć;
- e. przeprowadzić analizę sitową: przesiać zmielony węgiel aktywny, sita molekularnego i keramzyt przez sita o zadanej wielkości oczek;
- f. zważyć każdą z otrzymanych frakcji.

Młyn kulowy, sita, wagę analityczną oraz stanowisko laboratoryjne pozostawić czyste!

Studencie posprzątaj po sobie!

- WZÓR sprawozdania –

Data.....

Grupa

.....

.....

(Imię i Nazwisko)

Podstawy aparatury chemicznej – Sprawozdanie z ćwiczenia laboratoryjnego

Rozdrabnianie surowców w młynie kulowym

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Cel ćwiczenia
2. Krótki opis przebiegu doświadczenia
3. Schemat stanowiska laboratoryjnego
4. Tabele z uzyskanymi danymi
5. Obliczenia (stopień rozdrobnienie, analiza sitowa – podział na frakcje)
6. Wykresy i dyskusja otrzymanych wyników
7. Wnioski

Sposób oceny powyższych elementów sprawozdania:

Oceniany element	Pkt. 1	Pkt. 2	Pkt. 3	Pkt. 4	Pkt. 5	Pkt. 6	Pkt. 7	RAZEM
Ilość punktów do uzyskania	1	3	1	3	5	7	5	25

Łącznie do zdobycia jest 25 pkt, oceniane co 1pkt.

