

# UNIwersYTET GDAŃSKI

## WYDZIAŁ CHEMII



## TECHNOLOGIA CHEMICZNA

### Produkcja nawozów

Opracowała dr inż. Anna Gołąbiewska

## **1. WSTĘP**

### **1.1. Optymalizacja procesów technologicznych**

Jednym z często spotykanych problemów w pracach badawczo-rozwojowych oraz w badaniach naukowych jest taki dobór warunków prowadzenia procesu, aby uzyskać optymalną (minimalną lub maksymalną) wartość pewnej zmiennej. W zagadnieniach optymalizacji zmienną tą nazywamy **funkcją celu**, a zmienne zależne od naszej woli i opisujące warunki procesy nazywamy **zmiennymi kontrolnymi**. Z potrzebą zastosowania optymalizacji doświadczalnej spotkamy się szczególnie często w pracach badawczo-rozwojowych i zagadnieniach innowacyjnych dotyczących technologii chemicznej.

Wiele problemów doświadczalnych może być sformułowane jako zagadnienie eksperymentalne: wyznaczenie optymalnych warunków procesu, optymalny skład mieszaniny itd. Planowanie eksperymentu umożliwia równoczesne zmienianie wartości wszystkich czynników i uzyskanie ilościowych oszacowań efektów głównych i efektów współdziałań [1].

Działanie, które ma na celu poprawę efektywności produkcji, przyspieszenie produkcji, zmniejszenie kosztów, przy zachowaniu wysokiej jakości produktów, nazywa się optymalizacją procesów produkcyjnych. Aby ustalić optymalne warunki prowadzenia procesu, przeprowadza się doświadczenia, które pozwalają na określenie tych zmiennych, które wpływają na proces oraz na wybór modelu matematycznego opisującego proces [1].

Badania przeprowadzamy według programu, który powinien spełniać następujące wymagania:

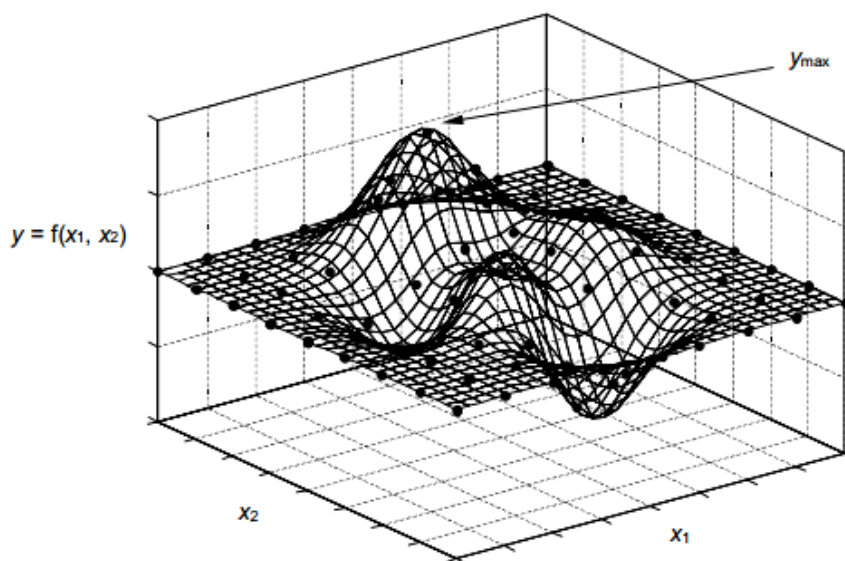
- a) doświadczenie powinno być tak wykonane, aby zebranie obserwacji można było uzgodnić, tzn. wnioski z doświadczenia rozszerzyć na inne warunki, mianowicie takie, w jakich będzie prowadzony proces,
- b) należy zbadać wpływ zmiennych tych parametrów, które oddziałują w sposób dla nas istotny na przebieg procesu, ale zmniejszyć liczbę parametrów badanych do niezbędnego minimum,
- c) program badań powinien być ułożony tak, aby można było uzyskać wszystkie niezbędne informacje, wykonując minimalną, niezbędną liczbę doświadczeń,
- d) wyniki doświadczeń należy krytycznie ocenić i przedstawić w postaci dogodnej do wykorzystania podczas projektowania procesu.

O wyborze metody optymalizacji decyduje przede wszystkim ilość optymalizowanych zmiennych [1].

## 1.2. Całkowite poznanie procesu – metoda badań kompletnych

Gdy nie znano jeszcze teorii eksperymentu, doświadczenia dotyczyły prostych układów, gdzie przyjmowano jedną lub dwie zmienne wejściowe. Wówczas prowadzono pomiary wielkości wyjściowej  $y$  dla  $n$  założonych wartości zmiennej wejściowej  $x$  i wyznaczano funkcję aproksymującą  $y=f(x)$ . Gdy badane obiekty stawały się coraz bardziej złożone, a liczba wielkości wejściowych zwiększała się, badania prowadzono metodą badań kompletnych. Doświadczenie przebiegało następująco:

- a) dla każdej zmiennej  $x_j$ ,  $j=1,2,3,\dots,s$  przyjmowano  $n$  wartości rozmieszczonych równomiernie w przedziale  $[x_j \text{ min}, x_j \text{ max}]$ ,
- b) wykonywano pojedynczy pomiar dla wszystkich możliwych kombinacji wartości wielkości wejściowych,
- c) na podstawie uzyskanych wyników wyznaczano funkcję aproksymującą, w przypadku dwóch zmiennych wejściowych  $y = f(x_1, x_2)$ ,
- d) dokonywano graficznej interpretacji (rys. 1) w celu np. odnalezienia ekstremum funkcji.



**Rysunek 1** Graficzna interpretacja funkcji o dwóch zmiennych wejściowych – plan kompletny [2]

Metoda ta, choć daje pełny obraz zależności zmiennych wejściowych oraz efektów współdziałań, przy większej ilości zmiennych jest ograniczona ilością doświadczeń, jakie trzeba wykonać. Stosowanie tej metody dla obiektów bardziej złożonych skutkuje tak zwaną „eksplozją kombinatoryczną”, ilość pomiarów jakie trzeba wykonać oblicza się ze wzoru (1):

$$N = n^k \quad (1)$$

gdzie  $n$  – liczba poziomów,  $k$  – liczba czynników (zmiennych).

W przypadku, gdy ilość zmiennych wynosi 10, a ich wartości przyjmuje się na 10 poziomach, a czas trwania jednego pomiaru wynosiłby 1 s, całkowity czas badań tą metodą wynosiłby aż 317 lat. Ze względu na to, że procedura tych badań jest czasochłonna, w praktyce w sposób intuicyjny obiera się do badań jedynie określony obszar, w którym przewiduje się znalezienie optymalnych parametrów [2].

W literaturze istnieje wiele metod planowania eksperymentów ekstremalnych, do których między innymi zalicza się: całkowity eksperyment czynnikowy, eksperymenty ułamkowe, optymalizacja metodą największego spadku na powierzchnię odpowiedzi, krokowa metoda najszybszej poprawy (algorytm Boxa-Wilsona), plany ortogonalne drugiego rzędu, plany rotatabilne drugiego rzędu Boxa-Huntera, kryteria optymalnego planu, badanie powierzchni odpowiedzi, funkcja wyboru, eksperyment czynnikowy  $2^{2k}$  połączony z kwadratem łacińskim, metoda sekwencyjnego planowania simpleksowego, ortogonalny plany nasycone Placketta-Murmana, doświadczenie eliminujące- metoda bilansu losowego oraz planowanie doświadczeń w celu wyznaczenia stałych równań kinetyki formalnej [3].

Do najbardziej powszechnie stosowanych metod zalicza się krokową metodę najszybszej poprawy, metodę simpleksów, oraz pełny i niepełny eksperyment czynnikowy.

### **1.3. Krokowa metoda najszybszej poprawy (algorytm Boxa-Wilsona)**

Dużo skuteczniejszą metodą poszukiwania ekstremum jest optymalizacja wzdłuż kierunku najszybszej poprawy. Wymaga ona nieco więcej obliczeń numerycznych niż metoda Gaussa, daje jednak większe prawdopodobieństwo znalezienia obszaru występowania ekstremum [3].

Proces optymalizacji dzieli się tu na 2 etapy. W etapie pierwszym tworzony jest liniowy model regresyjny, przy pomocy którego szacuje się gradient funkcji celu, a następnie wyznacza się kierunek najszybszej poprawy. W drugim etapie dokonujemy optymalizacji wzdłuż kierunku poprawy, który został określony w poprzednim etapie. Po znalezieniu optimum wzdłuż tego kierunku punkt optymalny staje się środkiem nowego planu dla modelu liniowego. Oba etapy powtarzamy aż do spełnienia kryterium stopu, którym w algorytmach tego typu jest zwykle długość wektora gradientu lub istotność statystyczna jego składowych [3].

### **1.4. Metoda simpleksów**

Jedną z ciekawszych metod optymalizacji bezgradientowej, która znalazła szerokie zastosowanie w optymalizacji doświadczalnej jest metoda simpleksów, w której punkty doświadczalne rozmieszczone są w wierzchołkach wielowymiarowych w przestrzeni

czynnikowej. Metoda ta oparta jest na porównaniu wartości funkcji celu w  $k+1$  wierzchołkach simpleksu i przesuwaniu do w kierunku ekstremum. Do optymalizacji wykorzystuje się następującą ważną cechę simpleksu: naprzeciw dowolnego wierzchołka  $A_j$  znajduje się tylko jedna krawędź (ściana), na której można zbudować nowy simpleks różniący się od poprzedniego położeniem wierzchołka  $A'_j$ , podczas gdy pozostałe wierzchołki obu simpleksów są identyczne. Odrzucając kolejno wierzchołki, realizuje się ruch początkowego simpleksu w przestrzeni czynnikowej [2].

Metoda planowania simpleksowego jest następująca: planuje się początkową serię doświadczeń w taki sposób, aby odpowiednie warunki realizacji tych doświadczeń tworzyły w przestrzeni czynnikowej simpleks foremny. Po wykonaniu doświadczeń ustala się wierzchołek odpowiadający warunkom, w których uzyskano najgorszy wynik. Następnie konstruuje się nowy simpleks, zastępując najgorszy punkt simpleksu początkowego punktem, który położony jest symetrycznie względem środka krawędzi simpleksu, znajdującej się naprzeciw najgorszego punktu. Nowy punkt wraz z pozostałymi tworzy foremny simpleks, którego środek ciężkości przesunięty jest w porównaniu z początkowym w kierunku: najgorszy punkt- środek ciężkości pozostałych punktów. W ogólnym przypadku nie jest to kierunek najbardziej stromy, jednakże skierowany jest on w stronę poprawy jakości procesu. Po zrealizowaniu doświadczenia w dodatkowym punkcie ponownie przeprowadza się porównanie wyników, następnie ustala się punkt o najgorszym wyniku i zamienia się go na jego lustrzane odbicie itd. Takie stopniowe poruszanie się z odrzuceniem najgorszych punktów powtarza się aż do osiągnięcia obszaru bliskiego do ekstremum [2].

### **1.5. Pełny i niepełny eksperyment czynnikowy**

Podczas planowania eksperymentu według schematu całkowitego czynnikowego realizuje się wszystkie możliwe kombinacje czynników występujących na wybranych do badań poziomach. Metoda wchodzi w zakres planowania dwupoziomowego (poziom górny i poziom dolny), gdyż na wyższych poziomach całkowity eksperyment byłby zbyt czasochłonny. Zatem, w celu ustalenia wpływu zmiennych parametrów niezależnych, będziemy badali proces przy dwóch wartościach każdego niezależnego parametru  $x$ , będą to:

**Górny poziom**  $x'_1, x'_2, x'_3 \dots x'_n$

**Dolny poziom**  $x''_1, x''_2, x''_3 \dots x''_n$

**Przedział zmian**- nazwiemy połowę odległości między poziomami np.

$$\frac{x'_1 - x''_1}{2}, \frac{x'_2 - x''_2}{2}, \frac{x'_3 - x''_3}{2}$$

**Podstawowy poziom** leży w połowie między górnym a dolnym np.

$$\frac{X'_1 - X''_1}{2}, \frac{X'_2 - X''_2}{2}, \frac{X'_3 - X''_3}{2}$$

**Zredukowane parametry**  $x_1, x_2, x_3$ .. obliczamy ze stosunku

$$x = \frac{\text{różnica między poziomem danym a podstawowym}}{\text{przedział zmian}}$$

otrzymany dla poziomu:

$$\text{górnego: } x' = \frac{X' - \frac{X' + X''}{2}}{\frac{X' - X''}{2}} = +1$$

$$\text{i dolnego: } x'' = \frac{X'' - \frac{X' + X''}{2}}{\frac{X' - X''}{2}} = -1$$

Planując doświadczenie wygodniej jest opuścić jedność, pisząc dla poziomu górnego zamiast +1 znak (+), dla poziomu dolnego zamiast -1 znak (-).

### Przykład:

Zmienna zależna  $y$  zależy od trzech zmiennych niezależnych  $x_1, x_2$  i  $x_3$ . Zakładamy, że wystarczy ustalenie wartości  $x_1$  i  $x_2$  na dwóch poziomach (górnym i dolnym) oraz zależność można opisać niepełnym wielomianem drugiego stopnia (2):

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (2)$$

Liczba doświadczeń w pełnym eksperymencie jest równa liczbie poziomów (2, tj. górny i dolny) do potęgi równej liczbie zmiennych niezależnych (2, tj.  $x_1, x_2$ ) więc  $2^2$ .

Plan pełnego eksperymentu dla 2 zmiennych niezależnych na 2 poziomach:

**Tabela 1** Plan pełnego eksperymentu

| Planowane |       |       | Obliczone | Zmierzone |
|-----------|-------|-------|-----------|-----------|
| $x_0$     | $x_1$ | $x_2$ | $x_1x_2$  | $y_k$     |
| +         | -     | -     | +         | $y_1$     |
| +         | +     | -     | -         | $y_2$     |
| +         | -     | +     | -         | $y_3$     |
| +         | +     | +     | +         | $y_4$     |

W kolumnie  $x_0$  piszemy zawsze +1, więc +.

Wartości  $x_1$  i  $x_2$  wpisujemy w czterech różnych, możliwych zestawieniach.

Iloczyn  $x_1x_2$  uzyskujemy, mnożąc  $x_1$  przez  $x_2$ .

Dla tak ułożonych warunków, na podstawie czterech doświadczeń, określamy wartości zmiennej zależnej  $y$ :  $y_1, y_2, y_3$  i  $y_4$ . Mając tabelę planu i te wartości można obliczyć  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  z równania (2). Otrzymujemy równanie opisujące badany proces, dla innych dowolnych wartości  $x_1$  i  $x_2$  [1].

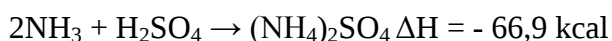
### **1.6. Przemysłowe otrzymanie siarczanu amonu**

Siarczan amonu  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  jest mineralnym nawozem azotowym o wysokiej zawartości siarki, który wykorzystywany jest jako surowiec do produkcji nawozów wieloskładnikowych i mieszanek nawozowych. Związek ten stosuje się również m.in. w przemyśle tworzyw sztucznych, włókienniczym oraz w farmacji. Znaczenie siarczanu amonu w ostatnim okresie zaczęło rosnąć, ponieważ postępujące odsiarczanie środowiska naturalnego spowodowane ograniczeniami emisji gazów z elektrowni, elektrociepłowni i urządzeń przemysłowych sprawiło, że w sposób odczuwalny uwidocznił się brak siarki w glebach. Szacuje się, iż światowe zużycie siarczanu amonu wynosi ok. 17 mln ton rocznie. Rynek siarczanu amonu ma zasięg globalny. Głównymi regionami przeznaczenia w eksporcie są Brazylia, Ameryka Środkowa, Europa Zachodnia oraz Afryka. Coraz większe znaczenie ma także rynek krajowy, gdzie w najbliższych latach przewidywany jest kilkunastoprocentowy wzrost zużycia siarczanu amonu. W Polsce produkt ten znajduje się w ofercie dwóch producentów. Zakładów Azotowych i Tarnowie oraz Puławach. Tarnowskie zakłady mają na tym polu przewagę, jego zdolności produkcyjne kształtują się na poziomie ok. 414 tys. ton rocznie. Tarnowski siarczan ma ugruntowaną pozycję na rynku światowym, a jego udział przewyższa 2%. Siarczan amonu stanowi w tej chwili ok. 12% w strukturze przychodów ze sprzedaży przez Tarnowską firmę. Szacowany popyt na rynku światowym to ok. 17,8 mln ton rocznie, na rynku europejskim 3,3 mln ton rocznie, a na rynku krajowych ok. 170 tys. ton rocznie. Na rynku europejskim do największych producentów tego nawozu zaliczyć należy duże koncerny niemieckie, czyli BASF oraz Lanxess, a także holenderskie DSM o zdolnościach produkcyjnych 130-230 tys. ton rocznie [4].

## **2. Metody otrzymywania siarczanu amonu**

Charakterystyczną cechą technologii soli mineralnych jest prawie powszechny brak stosowania procesów kontaktowych. Surowcem do produkcji soli mineralnych są minerały występujące w przyrodzie, półprodukty przemysłu chemicznego i odpady przemysłowe. Przykładem może być tu otrzymywanie siarczanu amonowego:

### **a) przez absorpcję amoniaku w kwasie siarkowym**



Do zobojętniania stosuje się albo amoniak syntezowy albo z gazu koksowniczego. W metodzie tej używa się stosunkowo drogi kwas siarkowy. Zastosowanie również dość drogiego amoniaku syntetycznego pozwala osiągnąć ok. 2-krotnie większą zdolność

produkcyjną aparatury (wydajność) niż w przypadku stosowania amoniaku koksowniczego. Metoda pierwsza jest obecnie najszerzej stosowana.

**b) przez działanie CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O na gips (anhydryt).**

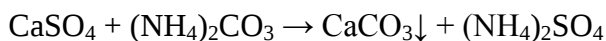


Istnieją dwie metody przerobu gipsu na siarczan amonowy:

- a) metoda gazowa –oparta na zastosowaniu NH<sub>3</sub> i CO<sub>2</sub> w fazie gazowej. Jest to metoda o ruchu okresowym, wymagająca użycia wysokiej czystości CO<sub>2</sub> i sprawiająca trudności w równoczesnym dozowaniu reagentów gazowych i z obsługą saturatorów pracujących pod ciśnieniem.
- b) metoda ciekła - w tej metodzie możliwe jest zastosowanie odpadowych NH<sub>3</sub> oraz CO<sub>2</sub> i zastosowanie taniego anhydrytu rodzimego lub np. szlamu z produkcji kwasu fosforowego (utylicacja tzw. fosfogipsu) [5].

**2.1.Wytwarzanie siarczanu amonowego z anhydrytu**

Wytwarzanie siarczanu amonowego z wykorzystaniem anhydrytu rodzimego polega na wykorzystaniu istniejącej różnicy iloczynu rozpuszczalności siarczanu i węglanu wapniowego. Rozpuszczalność gipsu w wodzie wynosi ok. 2,5 g/dm<sup>3</sup> węglanu wapniowego ok. 0,015 g/dm<sup>3</sup>.



Reakcja podwójnej wymiany przebiega łatwo z wydajnością dochodzącą do ok. 95% dzięki wydzielaniu się CaCO<sub>3</sub> ze środowiska reakcji. Szybkość wymiany zwiększa się ze wzrostem temperatury. W 55°C jest ona przeszło dwa razy większa dla 10% (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, niż temperaturze pokojowej. W stężonych roztworach szybkość reakcji gwałtownie wzrasta wraz z podwyższeniem temperatury. Powyżej 60°C reakcja przebiega w przeciwnym kierunku, jeżeli przez zwiększenie ciśnienia nie zapobiega się rozkładowi węglanu amonowego. Stosując nadmiar węglanu amonowego w krótkim czasie można przerobić całkowitą ilość gipsu w siarczan amonowy [5].

**LITERATURA**

1. Bretsznajder S., Podstawy ogólne technologii chemicznej, 1973.
2. Achazarowa S.Ł., Kafarow W.W., *Optymalizacja eksperymentu w chemii i technologii chemicznej*, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
3. Jan Mazerski, Podstawy Chemometrii, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 2000.
4. [www.plastech.pl](http://www.plastech.pl)
5. G. B. Cordell Reaction Kinetics of Production of Ammonium Sulfate from Anhydrite

### 3. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

#### 3.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie równania liniowego opisującego wydajność otrzymywania siarczanu amonu w zależności od trzech czynników: temperatury, stężenia  $\text{CaSO}_4$ , nadmiaru jednego z reagentów, wykonując połówkowe doświadczenie czynnikowe.

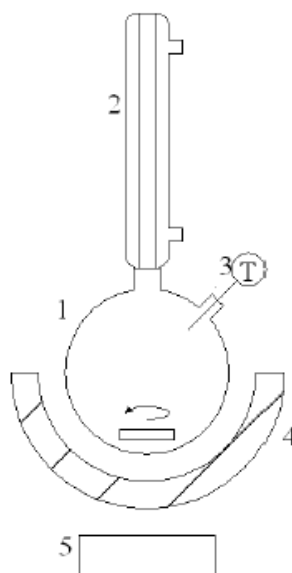
**Tabela 2** Plan eksperymentu

| Nr doświadczenia | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $y$   |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1                | +     | -     | -     | +     | $y_1$ |
| 2                | +     | +     | -     | -     | $y_2$ |
| 3                | +     | -     | +     | -     | $y_3$ |
| 4                | +     | +     | +     | +     | $y_4$ |

**Tabela 3** Zmienne niezależne procesu syntezy siarczanu amonu

| Symbol | Parametr                                       | Górny poziom (+) | Dolny poziom (-) |
|--------|------------------------------------------------|------------------|------------------|
| $x_0$  | Ciśnienie                                      | atmosferyczne    | -                |
| $x_1$  | Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]             | 50               | 30               |
| $x_2$  | Stężenie $\text{CaSO}_4$ [ $\text{mol/dm}^3$ ] | 0,2              | 0,1              |
| $x_3$  | Nadmiar $\text{NH}_4\text{HCO}_3$              | 2-krotny         | 1,5-krotny       |

#### 5.2. Aparatura



**Rysunek 2** Schemat stanowiska laboratoryjnego

Każde stanowisko składa się z kolby dwuszyjnej {1} o objętości  $250\text{ cm}^3$ , zaopatrzonej w chłodnicę zwrotną {2} i termometr {3}. Płaszcz grzejny {4} zaopatrzony w regulator

umożliwi kontrolowanie temperatury. Roztwór reakcyjny mieszany będzie za pomocą mieszadła magnetycznego {5}.

### **5.3. Procedura eksperymentu**

W trakcie laboratorium należy przeprowadzić trzy doświadczenia syntezy siarczanu amonu z zmiennymi parametrami. Plan doświadczeń oraz zakres parametrów przedstawiono w tabelach 2 i 3, gdzie:

$x_0$  - ciśnienie atmosferyczne

$x_1$  - temperatura [°C]

$x_1$  - stężenie  $\text{CaSO}_4$  [ $\text{mol/dm}^3$ ]

$x_1$  - stosunek molowy  $\text{NH}_4\text{HCO}_3/\text{CaSO}_4$

**Każde doświadczenie (1,2,3,4) należy przeprowadzić według poniższej instrukcji.**

### **3.4. Otrzymywanie siarczanu amonu.**

1. Na naczynku wagowym odważyć siarczan wapnia w ilości niezbędnej do przygotowania  $200\text{ cm}^3$  roztworu o stężeniu ( $x_2$ ). W obliczeniach uwzględnić procentową zawartość masy  $\text{CaSO}_4$  w gipsie.
2. Uwzględniając proporcje reagentów ( $x_3$ ) dla każdego doświadczenia, odważyć  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  na naczynku wagowym.
3. Umieścić  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  w kolbce dwuszyjnej wraz z  $200\text{ cm}^3$  wody destylowanej.
4. Włączyć mieszadło magnetyczne i rozpuścić  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ .
5. Ogrzewać roztwór aż do osiągnięcia zadanej temperatury reakcji ( $x_1$ ).
6. Małymi porcjami dodawać do kolbki dwuszyjnej  $\text{CaSO}_4$  kontrolując przy tym temperaturę.
7. Po dodaniu ostatniej porcji odczekać 10 minut.
8. Odsączyć powstały osad  $\text{CaCO}_3$ .
9. Klarowny przesącz przelać do cylindra miarowego (spisać objętość roztworu).

### **3.5. Oznaczanie siarczanów.**

1.  $20\text{ cm}^3$  roztworu (przesączu) pobrać pipetą do kolbki miarowej o objętości  $100\text{ cm}^3$  i dopełnić wodą destylowaną.
2. Do pięciu kolb stożkowych [0], [1], [2], [3], [4] pobrać pipetą  $5\text{ cm}^3$  roztworu siarczanu amonu.
4. Do wszystkich kolb stożkowych [0], [1], [2], [3], [4] dodać pipetą  $20\text{ cm}^3$  izopropanolu (cz. d. a.) oraz  $1\text{ cm}^3$  kwasu octowego (cz. d. a.).
5. Dodać do wszystkich pięciu kolbek stożkowych jedną kroplę wskaźnika arsenazo III.

6. Roztwór [4] miareczkować  $0,01 \text{ mol/dm}^3$  octanem baru w celu identyfikacji zmiany barwy roztworu z **różowo fioletowej na fioletową**.
7. Miareczkować kolbki [1], [2], [3] wobec wzorców [0], [4].
8. Obliczyć ilość moli otrzymanego siarczanu uwzględniając rozcieńczenie 1:5 oraz zmierzoną objętość uzyskanego roztworu.
9. Po trzech pomiarach wyznaczyć wielomian niepełnego eksperymentu [równanie (2)], gdy wynik (y) stanowi wydajność reakcji.

### **3.6. Opracowanie wyników badań**

1. Obliczenie wydajności teoretycznej [Pt] i rzeczywistej [Pr] procesów.
2. Wyznaczenie równania opisującego proces – obliczenie współczynników równania regresji.
3. Wskazanie, jaki parametr ma największy wpływ na wydajność.

*- WZÓR sprawozdania –*

Grupa .....

Data wykonania ćwiczenia:

.....

Data oddania sprawozdania:

.....

.....

.....

**Technologia Chemiczna – Sprawozdanie z ćwiczenia  
Produkcja nawozów**

**Cel ćwiczenia:**

**Krótki opis przebiegu doświadczenia:**

**Obliczenia:**

**Wnioski:**

**Uwaga** – podczas wykonywania każdego z ćwiczeń należy uzupełniać dane w protokole laboratoryjnym (dostępny poniżej), który musi zostać podpisany na każdej stronie przez prowadzącego zajęcia i dołączony do sprawozdania.

**Protokół laboratoryjny z ćwiczenia**  
**Produkcja nawozów**

Data wykonania ćwiczenia: .....

Grupa:.....

.....

.....

.....

.....

*(Imię i Nazwisko)*

**Tabela 4**

|          | <b>x<sub>1</sub></b><br><b>(temperatura)</b> | <b>x<sub>2</sub></b><br><b>(stężenie CaSO<sub>4</sub>)</b> | <b>x<sub>3</sub> (nadmiar NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>)</b> | <b>y</b>       |
|----------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>1</b> |                                              |                                                            |                                                              | y <sub>1</sub> |
| <b>2</b> |                                              |                                                            |                                                              | y <sub>2</sub> |
| <b>3</b> |                                              |                                                            |                                                              | y <sub>3</sub> |
| <b>4</b> |                                              |                                                            |                                                              | y <sub>4</sub> |

**Tabela 5**

| <b>Nr eksperymentu</b>                                                 | <b>I</b> | <b>II</b> | <b>III</b> | <b>IV</b> |
|------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------------|-----------|
| <b>x<sub>1</sub> temperatura [°C]</b>                                  |          |           |            |           |
| <b>x<sub>2</sub> m CaSO<sub>4</sub> [g]</b>                            |          |           |            |           |
| <b>x<sub>3</sub> m NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> [g]</b>               |          |           |            |           |
| <b>m (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> teoretyczna [g] Pt</b> |          |           |            |           |
| <b>V przesączu [cm<sup>3</sup>]</b>                                    |          |           |            |           |
| <b>C (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Ba [cm<sup>3</sup>]</b>            |          |           |            |           |
| <b>m (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> rzeczywista [g] Pr</b> |          |           |            |           |
| <b>Wydajność [%], W=Pr/Pt</b>                                          |          |           |            |           |

Podpis prowadzącego

.....

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Opis przeprowadzonego ćwiczenia.
2. Równania zachodzących reakcji.
3. Obliczenia:
  - a) ilość substratów użytych do przeprowadzenia reakcji dla każdego z przeprowadzonych eksperymentów
  - b) wydajność teoretyczna i rzeczywista dla zachodzących reakcji
4. Wyznaczenie równania liniowego opisującego wydajność otrzymywania siarczanu amonu oraz wskazanie czynnika, który ma największy wpływ na wydajność reakcji.
5. Krytyczną analizę wyników i wnioski.
6. Protokół laboratoryjny podpisany przez prowadzącego ćwiczenia.