

Wiesław Pudlik

TERMICZNA PRZERÓBKA ODPADÓW

PODSTAWY
TEORETYCZNE

Gdańsk 2014

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Janusz T. Cieśliński

RECENZENT
Zbigniew Bis

PROJEKT OKŁADKI
Katarzyna Olszonowicz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog>
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.gda.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2014

ISBN 978-83-7348-569-3

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 9,3 ark. druku 10,25, 10xx/798

Druk i oprawa: *EXPOL* P. Rybiński, J. Dąbek, Sp. Jawna
ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek, tel. 54 232 37 23

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	5
1. STECHIOMETRIA	7
1.1. Ogólne wiadomości o paliwach i spalaniu	7
1.2. Spalanie paliw stałych i ciekłych	8
1.3. Spalanie paliw gazowych	18
1.4. Stechiometryczna kontrola spalania	22
1.5. Zgazowanie paliw	27
2. TERMODYNAMIKA	29
2.1. Bilans cieplny procesu chemicznego	29
2.2. Bezwzględne entalpie	30
2.3. Ciepło reakcji	32
2.4. Wartość opałowa	34
2.5. Przybliżone wzory na wartość opałową	36
2.6. Potencjały termodynamiczne i powinowactwo chemiczne	39
2.7. Warunki równowagi systemów reagujących chemicznie	40
2.8. Stała równowagi chemicznej	43
2.9. Stała równowagi chemicznej a potencjał Gibbsa	46
2.10. Stopień przereagowania	49
2.11. Dysocjacja spalin	53
2.12. Jonizacja gazów spalinowych	55
2.13. Bilans energii urządzeń spalających	56
2.14. Sprawność urządzeń spalających paliwo	59
2.15. Temperatura spalania	61
3. KINETYKA PROCESÓW CHEMICZNYCH	64
3.1. Szybkość reakcji	64
3.2. Reakcje elementarne	68
3.3. Czasowy przebieg reakcji jedno- i dwucząsteczkowych	71
3.4. Reakcje złożone	74
3.5. Reakcje łańcuchowe	75
3.6. Reakcje heterogeniczne	78
4. ZAPŁON	79
4.1. Ciepła teoria samozapłonu	79
4.2. Łańcuchowa teoria samozapłonu	85
4.3. Stężeniowe granice zapłonu	86
4.4. Samozapłon paliwa stałego	88
4.5. Zapłon wymuszony	89

5. PŁOMIENIE	93
5.1. Kształt płomienia i prędkość spalania	93
5.2. Struktura płomienia laminarnego	100
5.3. Płomienie turbulenne	103
5.4. Stabilizacja płomienia	111
6. SPALANIE PALIW GAZOWYCH	120
6.1. Spalanie kinetyczne	121
6.2. Spalanie dyfuzyjne	124
6.3. Spalanie kinetyczno-dyfuzyjne	129
7. SPALANIE ODPADÓW CIEKŁYCH	131
7.1. Spalanie na swobodnej powierzchni	131
7.2. Spalanie pojedynczej kropli	132
7.3. Spalanie kropeł w żagwi	138
8. PRZERÓBKA TERMICZNA ODPADÓW STAŁYCH	141
8.1. Przebieg procesu	141
8.2. Spalanie lub zgazowanie w warstwie	145
8.3. Spalanie na ruszcie ruchomym	147
8.4. Spalanie lub zgazowanie w złożu fluidalnym	149
9. EKOLOGIA	151
9.1. Powstawanie zanieczyszczeń	153
9.2. Ograniczanie emisji szkodliwych związków	158
ZAŁĄCZNIK	162
LITERATURA	167

PRZEDMOWA

Przeróbka termiczna odpadów stałych obejmuje procesy spalania, zgazowania i pirolizy. W ich wyniku odpady zamieniają się w produkty gazowe i masę mineralną zwaną popiołem lub żużlem.

Spalanie polega na utlenianiu zawartych w odpadach głównych pierwiastków palnych: węgla pierwiastkowego C i wodoru H – po uprzednim odparowaniu wilgoci zawartej w tych odpadach. Powstałe w procesie spalania gazy spalinowe, czyli spaliny, usuwane są, po oczyszczeniu ze składników szkodliwych, do atmosfery. Natomiast popiół utylizowany jest metodami właściwymi dla substancji mineralnych.

Zgazowanie – to przetworzenie odpadów w gaz palny zawierający tlenek węgla CO, wodór H₂ i metan CH₄ oraz ewentualnie trochę wyższych węglowodorów C_nH_m. Poza gazem palnym otrzymuje się również popiół. Gaz palny może zostać użyty do celów przemysłowych jako surowiec (szczególnie, gdy nie zawiera azotu z powietrza) albo jako paliwo w silniku lub kotle, po czym produkty spalania usuwane są do otoczenia.

Procesowi spalania odpadów, względnie gazów ze zgazowania odpadów, towarzyszy wytworzenie energii cieplnej, która pobrana od spalin przekazywana jest następnie jako ciepło do celów ogrzewniczych lub służy do napędu silników cieplnych poruszających z kolei generatory prądu elektrycznego. W ten sposób pozbywając się odpadów otrzymuje się jednocześnie użyteczny efekt energetyczny – dlatego można w takich przypadkach mówić o **utylizacji** odpadów.

Piroliza, czyli rozkład pod wpływem wysokiej temperatury bez obecności tlenu, stosowana jest do przekształcenia tych odpadów, które są szczególnie szkodliwe dla ludzi lub otoczenia, w obojętne lub mało szkodliwe związki.

Teoretyczne podstawy procesów termicznej przeróbki odpadów obejmują przede wszystkim trzy działy ogólne:

- stechiometrię,
- termodynamikę,
- kinetykę chemiczną.

Stechiometria rozpatruje **bilans pierwiastków** przed i po procesie. Ogólna liczba pierwiastków jest, jak wiadomo, taka sama przed jak i po procesie – zmienia się natomiast konfiguracja atomów tych pierwiastków w molekułach – odmienna w substratach i produktach procesu chemicznego. Rozważania prowadzi się na pojedynczych atomach i molekułach występujących w równaniu reakcji, a potem przechodzi się na skalę makroskopową, posługując się kilomolem zawierającym $6,0225 \cdot 10^{26}$ tych cząstek.

Stechiometria pozwala obliczyć ilość potrzebnego utleniacza, przeważnie tlenu z powietrza, oraz ilość powstających produktów spalania lub zgazowania. Jednak obliczenie składu produktów zgazowania wymaga sięgnięcia do zasad wyłożonych w następnym rozdziale, czyli termodynamice.

Termodynamika posługując się pojęciem **potencjału termodynamicznego**, pozwala określić kierunek przebiegu zamierzonego procesu chemicznego i warunki równowagi do jakiej proces zawsze zmierza. W szczególności można obliczyć skład reagentów w tym stanie równowagi. Reagenty są zawsze mieszaniną substratów i produktów, przy czym zależnie od temperatury przewagę mają te pierwsze lub te drugie. W praktyce chodzi zawsze o silną przewagę produktów, a tym samym o duży stopień przereagowania.

Wnioski z rozważań termodynamicznych są ogólnie obowiązujące i nie zależą ani od aparatury, ani od czasu przebiegu procesu.

Kinetyka procesów termochemicznych zajmuje się czasowym przebiegiem tych procesów. Podstawowym pojęciem jest tu **szybkość reakcji** uzależniona przede wszystkim od warunków, w jakich mogą się zetknąć ze sobą atomy węgla C i wodoru H tworzące substancję palną odpadu z atomami tlenu z utleniacza. Utleniaczem przeważnie jest powietrze atmosferyczne, a w procesach zgazowania również para wodna.

Ponadto dla zrozumienia procesów termicznej przeróbki odpadów potrzebna jest znajomość szeregu bardziej szczegółowych zagadnień występujących w tych procesach. Są to następujące zagadnienia:

- zapłon,
- struktura i propagacja płomienia,
- techniczne aspekty spalania gazów palnych i paliw ciekłych oraz spalania i zgazowania ciał stałych,
- ekologia.

Całość przedstawionej problematyki podana jest w sposób systematyczny w niniejszym podręczniku. Podane są w nim niezbędne dla inżyniera praktyka koncepcje teoretyczne i wynikające z nich formuły obliczeniowe oraz wiadomości umożliwiające zrozumienie zachodzących zjawisk. Dobór treści i sposób prezentacji opiera się na wieloletnim doświadczeniu autora w nauczaniu termodynamiki technicznej, teorii spalania i termodynamicznych podstaw ogniw paliwowych.

Gdańsk, 2014 r.