

Władysław KASIECZKA

Instytut Techniki Ciepłej i Chłodnictwa  
Politechniki Łódzka

PORÓWNANIE METOD WYZNACZANIA SPADKÓW CIŚNIENIA  
W SKRAJNIE PŁYTKIM GRUBOZIARNISTYM ZŁOŻU FLUIDALNYM

Streszczenie: W pracy dokonano analizy problemów występujących przy określaniu spadku ciśnienia w skrajnie płytkim gruboziarnistym złożu fluidalnym oraz scharakteryzowano zjawiska występujące w tak specyficznym złożu. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych.

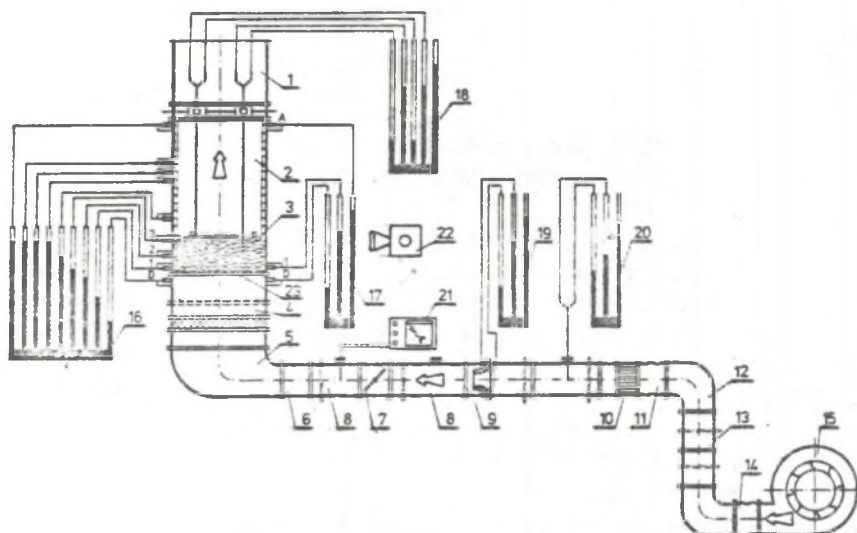
1. Wstęp

Skrajnie płytkie gruboziarniste  $d = 6+40$  mm złoża fluidalne charakteryzują się specyficznymi własnościami odbiegającymi od szeroko stosowanych złóż drobnoziarnistych ( $d < 1$  mm). Stosunek wysokości badanego złoża do średnicy ziarna wynosi od kilka do kilkudziesiąt, a dla złóż drobnoziarnistych - kilka tysięcy i więcej.

Aby określić parametry pracy takiego złoża, istnieje konieczność znajomości aerodynamiki złoża, a więc określenia parametrów przepływowych w zależności od: wymiarów geometrycznych złoża i dystrybutora, własności złoża oraz ziaren. Wpływ tych parametrów dla tego typu fluidyzacji nie jest dotychczas znany. Stosowanie zależności, występujących szeroko w literaturze a dotyczących fluidyzacji wysokiego złoża drobnoziarnistego, prowadzi do bardzo dużych błędów ze względu na całkowicie odmienny charakter pracy gruboziarnistych płytkich złóż fluidalnych. Ukazało się kilka prac [1,2,3,4,5,6], w których autorzy opisują złoża o ziarnach o średnicy  $0,5 < d < 5$  mm, nazywając je złożami gruboziarnistymi oraz także płytkimi z tego względu, że ich wysokość była mniejsza od średnicy kolumny. Niektóre ze zjawisk występujących w tych złożach występowało także w badanym złożu. Istnieje literatura na temat badań gruboziarnistego złoża nieruchomego o różnym stopniu rozluźnienia [7,8,9], Wyniki tych badań mogą być użyteczne w niektórych przypadkach przy analizie procesu fluidyzacji podobnych złóż.

2. Opis stanowiska badawczego

W celu przeprowadzenia badań aerodynamiki skrajnie płytkiego gruboziarnistego złoża fluidalnego zostało zbudowane stanowisko, którego schemat budowy i zasadę działania przedstawia rys.1.



Rys.1. Stanowisko do badań aerodynamiki skrajnie płytkiego gruboziarnistego złoża fluidalnego: 1 - odcinek kanału 400 x 600 mm, 2 - kolumna fluidyzacyjna, 3 - złożo, 4 - komora wyrównawcza, 5 - kolona z kierownicami, 6 - dyfuzor, 7 - przepustnica, 8 - kanał  $\varnothing$  250 mm, 9 - dysza ISA, 10 - prostownica strumienia, 11, 14 - rękaw tkaninowy, 15 - wentylator, 16 - mikromanometr do pomiaru spadku ciśnienia w złożu, 17 - mikromanometr do pomiaru spadku ciśnienia w układzie dystrybutor-złożo, 18 - mikromanometr wraz z sondami, 19 - mikromanometr do pomiaru spadku ciśnienia w dyszy ISA, 20 - mikromanometr wraz z sondą Prandtla, 21 - termometr, 22 - kamera filmowa, 23 - dystrybutor (sito).

Głównymi elementami stanowiska pomiarowego były: kolumna fluidyzacyjna (2), złożo (3), dystrybutor (23).

Kolumna fluidyzacyjna o przekroju prostokątnym (400 x 590 x 1000 mm) miała przednią i tylną ściankę wykonaną ze szkła, co umożliwiało obserwację zjawisk w złożu fluidalnym oraz ich wizualizację. W kołnierzach kolumny oraz wzdłuż wysokości ścianek wykonano króćce do pomiaru ciśnienia w złożu.

Złożo stosowane do badań składały się z ziaren kulistych o średnicach: 12,36 mm, 24,82 mm i gęstości  $1015 \text{ kg/m}^3$  oraz średnicy 37,70 mm i gęstości  $825 \text{ kg/m}^3$ .

Dystrybutor sito był elementem wymiennym. Stosowane dwa typy dystrybutorów, różniące się wymiarami otworów i prześwitem: siatki i płyty perforowane.

Parametry pracy stanowiska i program badań zostały dobrane tak, aby obejmowały zakres pracy urządzeń przemysłowych, gdzie tego typu fluidyzacja występuje (fluidyzacyjne tunele zamrażalnicze).

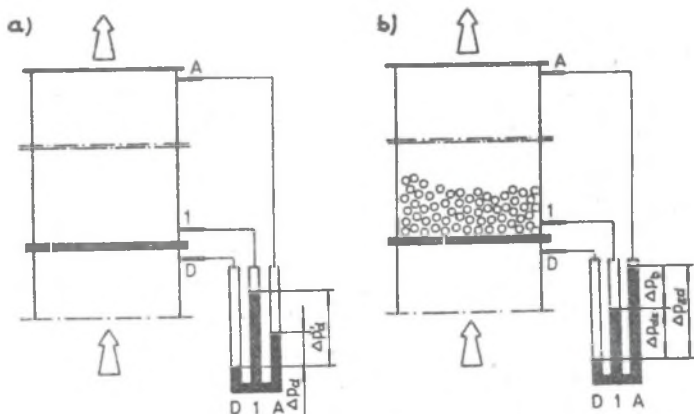
Podczas badań wykonywano pomiary dla określenia ilości i parametrów przepływającego powietrza oraz pomiary spadków ciśnienia w dystrybutorze i w złożu. Dla każdego typu dystrybutora pomiary wykonano dla przypadku bez złoża oraz w obecności złoża. W przypadku obecności złoża, zmieniała się średnica ziaren oraz jego wysokość.

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Opis sposobów pomiaru spadków ciśnienia w złożu i w dystrybutorze

Początek fluidyzacji występuje wtedy, gdy siła ciężkości złoża zrówna się z siłą parcia przepływającego płynu. Zakłada się teoretycznie, że spadek ciśnienia w złożu fluidalnym jest stały i w przybliżeniu równy spadkowi ciśnienia w złożu przy prędkości płynu w momencie rozpoczęcia się fluidyzacji tzw. minimum fluidyzacji, kiedy to złożo jest rozluźnione i jeszcze nieruchome. Z tego powodu do obliczeń stosuje się empiryczne korelacje dla złożów nieruchomych o odpowiednim stopniu rozluźnienia [8,9]. Zasady tej, dającej dość dokładne wyniki dla drobnoziarnistych złożów wysokich, nie można stosować w przypadku opisywanego w niniejszej pracy złoża, ze względu na inny charakter fluidyzacji oraz znaczny wpływ dystrybutora.

Schemat pomiaru spadków ciśnienia w kolumnie fluidyzacyjnej dla przypadku bez złoża pustego dystrybutora i ze złożem przedstawia rys.2.



Rys.2. Schemat pomiaru spadków ciśnienia w kolumnie  
a) bez złoża, b) ze złożem.

Spadek ciśnienia w dystrybutorze pustym może być określony poprzez pomiar jako  $\Delta p_d = p_D - p_A$  lub  $\Delta p'_d = p_D - p_1$ , ponieważ spadek ciśnienia w samej kolumnie (bez złoża i dystrybutora) jest pomijalnie mały. Usytuowanie punktu 1 (na granicy dystrybutor - złożo) jest wymuszone sposobem pomiaru spadków ciśnienia w przypadku obecności złoża (rys.2). Spadek ciśnienia w dystrybutorze określony jako  $\Delta p'_d = p_D - p_1$  nie uwzględnia spadku ciśnienia płynu na skutek rozprężania się po wypływie z otworów dystrybutora

do przestrzeni kolumny ( $\Delta p_r = p_1 - p_A$ ), stąd

$$\Delta p_d = \Delta p'_d + \Delta p_r \quad (1)$$

Spadek ciśnienia w dystrybutorze w obecności złoza można określić jako

$$\Delta p_{dz} = p_D - p_1 \quad (\text{rys.2b}).$$

Spadek ciśnienia w badanym złożu można wyznaczyć dwoma sposobami (rys.2):

- bezpośrednio, poprzez pomiar różnicy ciśnienia na granicy dystrybutor-złoże (punkt 1) i nad powierzchnią swobodną złoza (punkt A), wtedy

$$\Delta p_b = p_1 - p_A = \Delta p_{zd} - \Delta p_{dz}, \quad (2)$$

- pośrednio, poprzez pomiar sumarycznego spadku ciśnienia w układzie dystrybutor - złoże (pomiar przed dystrybutorem i nad powierzchnią swobodną złoza)  $\Delta p_{zd}$  oraz spadku ciśnienia w dystrybutorze pustym bez złoza, a następnie wyliczeniu spadku ciśnienia w złożu jako różnicy obu zmierzonych spadków:

$$\Delta p_p = \Delta p_{zd} - \Delta p_d \quad (3)$$

$$\text{lub} \quad \Delta p'_p = \Delta p_{zd} - \Delta p'_d = \Delta p_{zd} - \Delta p_d + \Delta p_r \quad (4)$$

Spadek ciśnienia  $\Delta p'_p$  jest obciążony spadkiem ciśnienia rozprężającego się powietrza po wylocie z otworów dystrybutora, przy czym strefa rozprężania jest zaburzona obecnością ziaren. Należy pamiętać, że mierzymy średnie ciśnienie statyczne.

Określenie spadków ciśnienia w złożu i w dystrybutorze w obecności złoza jest bardzo trudne ze względu na wzajemny wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych na przepływ płynu oraz charakter fluidyzacji. Określenie tych wpływów wymaga wielu badań.

Celem określenia wzajemnych wpływów układów dystrybutor złoza oraz różnic między pomiarem bezpośrednim i pośrednim wprowadzono współczynnik wzrostu oporu hydrodynamicznego dystrybutora na skutek obecności złoza -  $z_D$ , zdefiniowany jako

$$z_D = \Delta p_{dz} - \Delta p_d \quad (5)$$

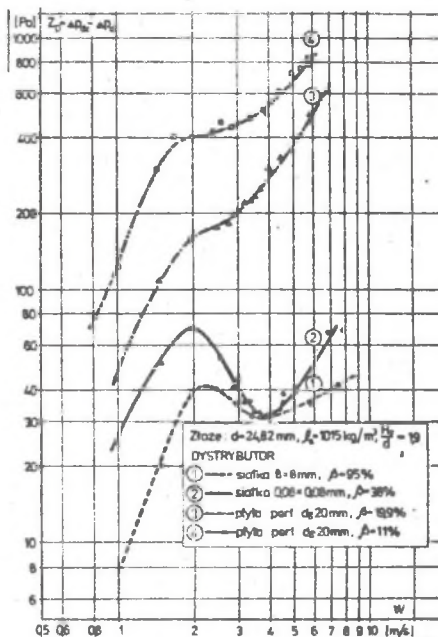
który po uwzględnieniu zależności (1), (2), (3), (4) będzie miał postać:

$$z_D = \Delta p_{dz} - \Delta p_d = \Delta p_p - \Delta p_b = \Delta p'_p - \Delta p_b - \Delta p_r \quad (6)$$

Dla wybranego przypadku układu dystrybutor - złoże charakter zmian

$z_D = f(w)$  przedstawiono na rys.3.

Na wartość  $z_D$  składa się wzrost oporu wynikającego ze zmniejszenia się liczby czynnych otworów i ich przekroju w dystrybutorze ze względu na obecność ziaren oraz efekt rozprężania się powietrza nad otworami dystrybutora o zaburzonej obecnością ziaren strukturze. Efekt rozprężania ma większą wartość w przypadku dystrybutorów w postaci płyt perforowanych.



Rys.3. Zależność współczynnika wzrostu oporu hydrodynamicznego dystrybutora dla skrajnie płytkiego gruboziarnistego złoża od prędkości przepływającego powietrza.

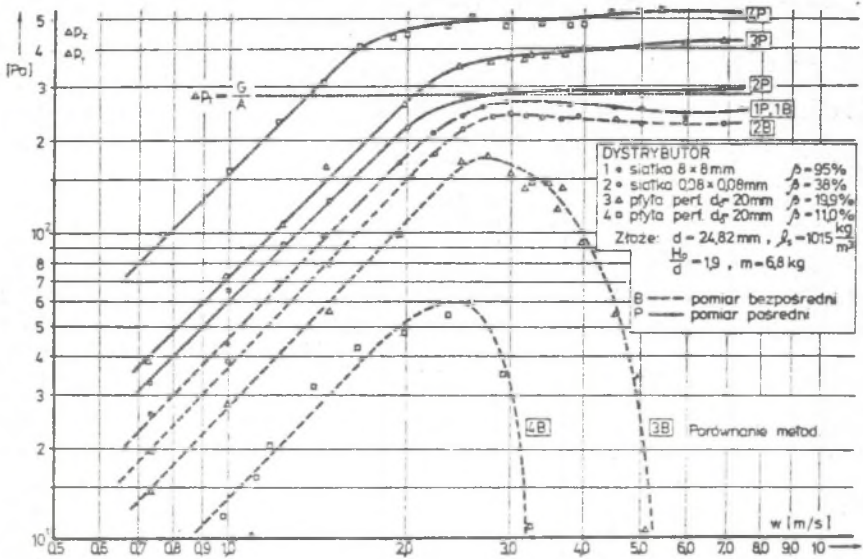
Ocena ilościowa poszczególnych składników  $Z_D$  jest bardzo trudna ze względu na wiele możliwości zmian struktury złoża w strefie dystrybutora.

Wyniki wyznaczania spadków ciśnienia w sposób bezpośredni i pośredni w skrajnie płytkim gruboziarnistym złożu przedstawiono przykładowo dla wybranego przypadku na rys.4.

Z analizy przebiegu krzywych na rys.4 wynika, że wyniki bezpośredniego pomiaru spadku ciśnienia w badanym złożu dają zdeformowane krzywe fluidyzacji. Otrzymywano nawet wyniki ujemne w przypadku, gdy spadek ciśnienia w wyniku rozprężania się powietrza w, pływającego z otworów dystrybutora był większy niż spadek ciśnienia w samym złożu.

W przypadku wyników pośredniego określenia spadku ciśnienia w badanym złożu charakter krzywych fluidyzacji jest zbliżony do przebiegu teoretycznego. Jak widać na rys.4 spadek ciśnienia w złożu dla tych samych ziaren i tej samej wysokości złoża zależy od typu dystrybutora. Wraz ze wzrostem wysokości złoża oraz zmniejszaniem się średnicy ziaren obserwowano stosunkowo mniejszy wpływ dystrybutora oraz zacieranie się różnic między pomiarem pośrednim i bezpośrednim spadku ciśnienia w złożu.

Uznano, że najbardziej odpowiedni w przypadku skrajnie płytkiego gruboziarnistego złoża jest pomiar pośredni spadku ciśnienia w złożu, ponieważ daje wyniki najbardziej zbliżone do rzeczywistych.



Rys.4. Zależność spadku ciśnienia w gruboziarnistym skrajnie płytkim złożu od prędkości przepływającego powietrza. Pomiar bezpośredni i pośredni.

### 3.2. Korelacje empiryczne spadku ciśnienia w skrajnie płytkim gruboziarnistym złożu fluidalnym

Dokonując analizy wyników własnych badań [10] dla różnego rodzaju złoż i dystrybutorów, biorąc tylko pod uwagę pomiar pośredni spadku ciśnienia w badanym złożu, otrzymano następujące korelacje empiryczne:

- siatka 8 x 8 mm,  $\beta = 95\%$  ( $\Delta p_d \approx 0$ )

$$Eu = 0,674 \cdot Ar^{0,94} \cdot Re^{-1,90} \cdot (H_0/d)^{1,03} \quad (7)$$

- siatka 0,08 x 0,08 mm,  $\beta = 38\%$

$$Eu = 0,324 \cdot Ar^{0,985} \cdot Re^{-1,90} \cdot (H_0/d)^{1,03} \quad (8)$$

- płyta perforowana  $d_0 = 20$  mm,  $\beta = 11\%$ ,  $\beta = 19,9\%$

$$Eu = 0,0031 \cdot Ar^{1,24} \cdot Re^{-1,90} \cdot (H_0/d)^{1,03}, \quad (9)$$

gdzie  $Eu = \frac{\Delta P_D}{w \cdot \rho}$ ;  $Ar = \frac{\rho \cdot d^3}{\nu^2} \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ ;  $Re = \frac{w d}{\nu}$ ,

przy czym  $Ar = (0,65 \div 16) \cdot 10^8$ ;  $H_0/d = 1,7 \div 19,0$ ,  $w/w_{mf} < 2,5$ ,

współczynnik korelacji  $r \sim 0,99$ .

Do obliczenia prędkości początku fluidyzacji (minimum fluidyzacji) badanego złoża otrzymano następującą korelację empiryczną:

$$Re_{mf} = 0,464 \cdot E_{mf}^{1,59} \cdot Ar^{0,53}, \quad 10$$

gdzie:  $E_{mf} = 0,38 \div 0,42$ ;  $Re_{mf} = w_{mf} \cdot d / \nu$ .

Otrzymane (8) i (9), (10) zależności dotyczą dystrybutorów i złożów spotykanych w technice.

### 3.3. Opis zjawisk w skrajnie płytkim gruboziarnistym złożu fluidalnym

Fluidyzacja gruboziarnistego skrajnie płytkiego złoża jest fluidyzacją typowo niejednorodną. Złoże, gdy prędkość przepływającego powietrza zbliża się do prędkości początku fluidyzacji (minimum fluidyzacji), rozluźnia się, a na jego górnej powierzchni zaczynają drgać pojedyncze ziarna. Przy dalszym niewielkim wzroście prędkości powietrza drga ich coraz to większa ilość. Dalszy wzrost prędkości powoduje tworzenie się pęcherzy, początkowo w górnych warstwach a później coraz głębszych. Podczas fluidyzacji ziarna skupiają się a gaz w postaci dużych pęcherzy porusza się do góry między zagęszczonymi partiami ziaren. Na powierzchni złoża pęcherz gazowy pęka i ziarna są wyrzucane do góry na stosunkowo duże wysokości. Zawsze jednak obserwuje się pozostawanie pewnej zalegającej warstwy ziaren na dystrybutorze, co z technologicznego punktu widzenia jest bardzo niekorzystnym zjawiskiem. Grubość tej warstwy zależy od prędkości powietrza i typu dystrybutora. W badanym złożu występuje o wiele mniejsze mieszanie się ziaren niż w złożach drobnoziarnistych.

### 4. Wnioski

- Przeprowadzone badania rozszerzają wiadomości dotyczące procesu fluidyzacji o badania specyficznych gruboziarnistych skrajnie płytkich złożów fluidalnych
- Charakterystycznym zjawiskiem występującym podczas fluidyzacji gruboziarnistych skrajnie płytkich złożów jest małe mieszanie się ziaren oraz zaleganie dalszych warstw na dystrybutorze
- Spadek ciśnienia w złożu zależy od rodzaju dystrybutora, ze względu na stosunkowo głęboką strefę rozprężania się powietrza po wypływie z otworów dystrybutora
- Istnieje wzajemny wpływ badanego złoża i dystrybutora, trudny do ilościowego określenia, dlatego pośredni pomiar spadku ciśnienia w złożu jest dla tego rodzaju złożów najkorzystniejszy.

Przedstawione wyniki są podstawą do dalszych badań modelowych i przemysłowych wymiany ciepła i masy.

Oznaczenia

A	- powierzchnia przekroju poprzecznego złoza
d	- średnica ziarna
G	- ciężar złoza
H <sub>o</sub>	- wysokość złoza przy prędkości $w_{mf}$
$P_D, P_A, P_1$	- ciśnienie statyczne w punktach D, A, 1
$\Delta P_d$	- spadek ciśnienia w dystrybutorze pustym
$\Delta P_{dz}$	- spadek ciśnienia w dystrybutorze w obecności złoza
$\Delta P_{zd}$	- spadek ciśnienia w układzie dystrybutor-złoze
$\Delta P_b$	- spadek ciśnienia w złożu, pomiar bezpośredni
$\Delta P_p$	- spadek ciśnienia w złożu, pomiar pośredni
$\Delta P_z$	- spadek ciśnienia w złożu
$\Delta P_t$	- teoretyczny spadek ciśnienia w złożu
$w_{mf}$	- prędkość minimum fluidyzacji
w	- prędkość przepływu powietrza przez złoze, odniesiona do przekroju pustej kolumny
$z_D$	- współczynnik określony zależnością (5)
S	- gęstość powietrza
$S_s$	- gęstość ziarna
$\beta$	- prześwit dystrybutora
$\nu$	- lepkość kinematyczna powietrza
$E_{mf}$	- porowatość złoza gdy $w = w_{mf}$

Literatura

- [1] Al Ali B.M.A., Broughton J.: Appl.Energy, 1977, 2, ss.101-114.
- [2] Čatipovič N.M., Jovanovič G.N., Fitzgerald T.J.: AIChE Journal, 1978 24, 2, s.543-547.
- [3] Cranfield R.R., Geldart D.: Chem.Eng.Science, 1974 (29), ss.935-947.
- [4] Fan L.T., Chang Y.: The Can.J.of Chem.Eng., 1979 (57) ss.88-97.
- [5] Loew O., Smutter B., Resnick W.: Powder Technology, 1979, 22, ss.45-57.
- [6] Mc Grath L., Streatfield R.E.: Trans.Inst.Chem.Engrs, 1973 (51), ss.361-368.
- [7] Wentz Ch.A., Thodos G.: AIChE Journal 1963 (9), 1, s.81-84 i 2, ss.358-361.
- [8] Barnea E., Mednick R.L.: The Chem.Eng.Journal, 1978, 15, ss.215-227.
- [9] Molerus O.: Chem.Eng.Science, 1980 (35), ss.1331-1340.
- [10] Kasieczka W.: Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 1983.



СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕПАДОВ ДАВЛЕНИЯ  
В КРУПНОЗЕРНИСТОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ С ОЧЕНЬ  
МАЛОЙ ТОЛЩИНОЙ

Резюме

Описываются некоторые исследования газодинамики псевдооживления крупнозернистого слоя ( $d = 10-40$  мм с очень малой толщиной. Показывается относительной толщины слоя ( $H/d$ ) а также геометрических размеров решетки на перепад давления в слое. В статье используются два метода экспериментального построения кривых псевдооживления - прямой и косвенный. Представляются результаты экспериментов.

COMPARISON OF METHODS OF MEASURING PRESSURE DROP  
IN THE FLOW OF AIR THROUGH MOST SHALLOW AIR-FLUIDIZED BEDS OF LARGE  
PARTICLES

Summary

The problems and the characteristic effects in most shallow air-fluidized beds ( $H/d \approx 20$ ) of large particles ( $d = 10 - 40$  mm) were analyzed in this paper and the experimental results of the research were also presented.