



2.1 เซรามิก (6-8)

เมื่อพูดถึงเซรามิกคนส่วนใหญ่มักจะนึกถึงเครื่องปั้นดินเผา ความจริงแล้วเซรามิกคือสารอนินทรีย์หรือของแข็งที่ประกอบด้วยโลหะและอโลหะ เวเลนซ์อิเล็กตรอนของโลหะสามารถเคลื่อนที่ไปและให้แก่อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของอโลหะได้ เกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันกับอะตอมของอโลหะแบบโคเวเลนต์ จึงทำให้วงนอกของอะตอมค่อนข้างสมบูรณ์

สภาวะของเซรามิกมีหลายแบบ เนื่องจาก

1. การรวมตัวกันระหว่างอะตอมของโลหะและอโลหะ เป็นไปได้หลายแบบ
2. การจัดโครงสร้างของการรวมตัวแต่ละแบบอาจจัดไปได้หลายอย่าง

เซรามิกส่วนใหญ่จะประกอบด้วยธาตุ 2 ชนิดหรือมากกว่า ธาตุที่ใช้กันมาก ได้แก่ คาร์บอน ซิลิกอน โบรอน ซึ่งทำให้อยู่ในรูปของ ออกไซด์ คาร์ไบด์ ไนไตรด์ ไบไรด์ และซิลิไซด์

คุณสมบัติของเซรามิก (7)

ลักษณะพิเศษของเซรามิกคือไม่เปราะหรือแตกง่าย ไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างหรือเปลี่ยนแปลงได้น้อยมาก นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นคือ ทนต่อความร้อนสูง (refractory, heat-resistant) มีคุณสมบัติทางแมคานิคัล (superior mechanical properties) มีคุณสมบัติพิเศษของไฟฟ้า (special electrical properties) และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาเคมีสูง (greater chemical resistivity) ซึ่งคุณสมบัติพิเศษเหล่านี้เหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุทางนิวเคลียร์ เพราะในการศึกษาทางด้านนิวเคลียร์นั้นจะต้องมีการพิจารณาสภาพทางเคมีของสารที่จะนำมาทำเป็นเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่เป็นโลหะมีความสามารถในการจับนิวตรอนสูง นำความร้อนดีและทนต่อเทอมัลช็อกสูง แต่ไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์

นิวเคลียร์แบบ high temperature เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ๆ โลหะจะมีความแข็งแรงต่ำลง (low strength) และเกิดวิฤภาคการเปลี่ยนแปลง (phase transformation) ของโครงสร้าง แต่สำหรับเชื้อเพลิงชนิดที่เป็นเซรามิกมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับอุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งมีประสิทธิภาพการขยายตัวต่ำ ทนต่อการสึกกร่อนได้ดี

เซรามิกที่เป็นออกไซด์ล้วน ๆ (pure ceramic oxide) ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ ออกไซด์ของอะลูมิเนียม ( $Al_2O_3$ ) เซอร์โคเนียม ( $ZrO_2$ ) ทอเรียม ( $ThO_2$ ) ฯลฯ สำหรับเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เซรามิกออกไซด์ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ ยูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) ซึ่งมีความสามารถในการรักษาคุณสมบัติที่ดีไว้ได้ แม้เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นเวลานาน

$UO_2$  สามารถทำให้มีรูปร่างต่าง ๆ ได้โดยวิธีการทางเซรามิก เช่น ทำเป็นเพลเล็ต (pellet) ท่อ (tube) แท่ง (rod)  $UO_2$  ที่เผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยหรือรีดิวซ์ซึ่งก๊าซจะเกิดเป็น  $U_3O_7$  ที่อุณหภูมิ  $1500^\circ$  เซลเซียส  $U_3O_8$  เกิดที่อุณหภูมิ  $375^\circ$  เซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า  $500^\circ$  เซลเซียส  $U_3O_8$  จะไม่เสถียรและเปลี่ยนเป็น  $UO_2$  อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ  $1100^\circ - 1300^\circ$  เซลเซียส

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ  $UO_2(s)$  มีสีน้ำตาลดำ (dark brown) มีรูปยูนิตเซลล์เป็นแบบเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (Face-Center Cubic, FCC ชนิด  $CaF_2$ ) มีจุดหลอมเหลว  $2760^\circ$  เซลเซียส ความหนาแน่น 10.97 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เตรียมได้จากการทำรีดักชันด้วยไฮโดรเจนของ  $UO_3$  หรือสารประกอบอื่น ๆ ของยูเรเนียม

การนำแร่ยูเรเนียมมาทำเป็นเชื้อเพลิง ต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอนคือ

1. การเพิ่มความเข้มข้น เป็นการแยกยูเรเนียมออกจากสารอื่น ๆ เช่น แคลเซียม โพแทสเซียม วาเนเดียม ผลที่ได้อาจอยู่ในรูปของโซเดียมไดยูราเนต ( $Na_2U_2O_7$ ) แอมโมเนียมไดยูราเนต  $[(NH_4)_2 U_2O_7]$

2. การทำให้บริสุทธิ์ ผลที่ได้จะอยู่ในรูปของยูเรเนียมไตรออกไซด์ ( $UO_3$ )  
ไตรยูเรเนียมออกไซด์ ( $U_3O_8$ )

3. การเสริมสมรรถนะ (enrichment) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นแบบใช้น้ำธรรมดาเป็นตัวหน่วงนิวตรอน จึงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะของปริมาณยูเรเนียม-235 การเสริมสมรรถนะนี้จะต้องผ่านกระบวนการแปรรูป (conversion) ไปเป็นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ ( $UF_6$ )

4. การขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งทำให้เกิดการคิดค้นกระบวนการใหม่ขึ้น คือ กระบวนการโซล-เจล เนื่องจากผลผลิตที่ได้จากกระบวนการโซล-เจล เป็นไมโครสเฟียร์ (microsphere) ซึ่งเป็นรูปทรงกลมขนาดเล็ก ๆ จึงสามารถนำไปบรรจุในแท่งเชื้อเพลิงได้เลยโดยไม่ต้องผ่านการขึ้นรูป เป็นการลดขั้นตอนการทำงานที่ยุ่งยากออกไปได้ขั้นตอนหนึ่ง

## 2.2 ขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการโซล-เจล

สารตั้งต้นของกระบวนการโซล-เจล เป็นสารธรรมดา ซึ่งได้จากกระบวนการนำเชื้อเพลิงที่ยังเหลืออยู่จากแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วกลับมาใช้ คือ ยูเรเนียมไนเตรท ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนสารให้อยู่ในรูปอื่น สามารถนำผลผลิตที่ได้จากกระบวนการนำเชื้อเพลิงกลับมาใช้เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการโซล-เจลได้เลย ขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการโซล-เจล คือ

### 1. การเตรียมโซลหรือบรอท (3)

การเตรียมโซลเป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการโซล-เจล โซลที่ดีจะต้องมีอายุการเก็บยาว และสามารถทำให้ความเข้มข้นของโซลสูงได้โดยไม่ทำให้เกิดเจลเลชันขึ้น ซึ่งคุณสมบัติหลังนี้ขึ้นกับตัวแปรหลายอย่างคือ ปริมาณของอิเล็กโทไลต์ ปริมาณยูเรเนียม อะมอร์ฟัส (amorphous urania) ออกซิเดชันสเตทและอัตราการศึกษาออกซิเดชัน (oxidation rate) ปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมไฮโดรไลติก ไคเนติกส์ (hydrolytic kinetics) ออกซิเดชันและการตกผลึกของยูเรเนียมจะแก้ไขได้โดยการสกัดไนเตรทออกให้มีเหลืออยู่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ต้องให้มีผู้พอที่จะป้องกันการเกิดเจลเลชันเท่านั้น เพราะกรดไนตริกทำให้เกิดออกซิเดชัน แต่เป็นสารป้องกันการเกิดเจลเลชัน

## 2. เจ เลชัน

การทำโซลหรือบรอปให้เป็นเจล ทำได้โดยวิธีการหลายอย่าง เช่น การดึงน้ำออก การเปลี่ยนความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนอุณหภูมิ การทำเจ เลชันโดยการดึงน้ำออกจากโซลนั้นมีข้อดีที่เจลที่ได้จะมีสารที่ระเหยได้อยู่ในปริมาณต่ำกว่าโซล จึงเป็นการลดความยุ่งยากในการทำให้แห้งและการเผา แต่ข้อเสียคือการทำเจ เลชันวิธีนี้อาศัยหลักการแพร่ของสาร ดังนั้น เจ เลชันจึงเกิดได้ช้ากว่าการทำเจ เลชันโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมี และการให้ความร้อน นอกจากนี้ไมโครสเฟียร์ที่ได้อาจมีขนาดเล็กกว่าไมโครสเฟียร์ที่ได้จากวิธีอื่น

การทำเจ เลชันโดยใช้ความร้อนและปฏิกิริยา เคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ไมโครสเฟียร์ที่ได้จะมีสีขุ่น ไมโครสเฟียร์ที่มีสีขุ่นจะมีขนาดของผลึกใหญ่พอที่จะล้างสารที่ระเหย ได้ที่ปนอยู่ในไมโครสเฟียร์ออกไปได้ง่าย ขณะที่ไมโครสเฟียร์ที่มีสีใสมีขนาดของผลึกเล็กและ เสียสมดุลของความดันออสโมติกมากจนไม่สามารถจะล้างสารที่ระเหยได้ที่เหลืออยู่ออกไปได้ ทำให้ไมโครสเฟียร์แตกในขั้นตอนถัดไป

## 3. การล้าง

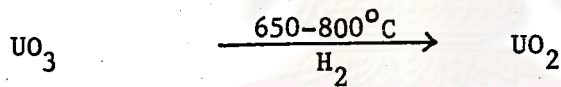
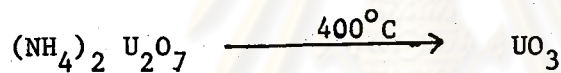
ขั้นตอนนี้ใช้เฉพาะกับเจ เลชันโดยปฏิกิริยาเคมี และ เจ เลชันโดยความร้อนเท่านั้น เนื่องจากมีสารที่ระเหยได้เหลืออยู่มาก ในไมโครสเฟียร์ การล้าง เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของเจ เลชันแบบนี้ เพราะถ้าล้างไม่ดีก็จะมีสารที่ระเหยได้ปนอยู่ในไมโครสเฟียร์ ซึ่งเป็นเหตุให้ไมโครสเฟียร์แตกขณะที่ทำให้แห้ง หรือ เมื่อนำไปเผาประสาน

จากการศึกษา พบว่า สารที่เป็นตัวให้แอมโมเนียซึ่งใส่ลงในโซลเพื่อให้เกิดเจ เลชันนั้นมีเพียง 5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่สลายตัวไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ที่เหลืออีก 95 เปอร์เซ็นต์ ตรวจพบได้ในขณะทำการล้าง แต่ความจริงแล้วปริมาณของสารที่ให้แอมโมเนียที่เหลืออยู่นั้นมีน้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ การที่ตรวจพบว่ามีเหลืออยู่ถึง 95 เปอร์เซ็นต์นั้น เนื่องจากมีบางส่วนเกิดขึ้นในขณะ ที่ล้าง เนื่องจากการรวมตัวกันของแอมโมเนียกับฟอร์มัลดีไฮด์(5) (ที่ได้จากการสลายตัวของสารที่ให้แอมโมเนียระหว่างเกิดเจ เลชัน)

#### 4. การทำให้แห้งและการเผาประสาน

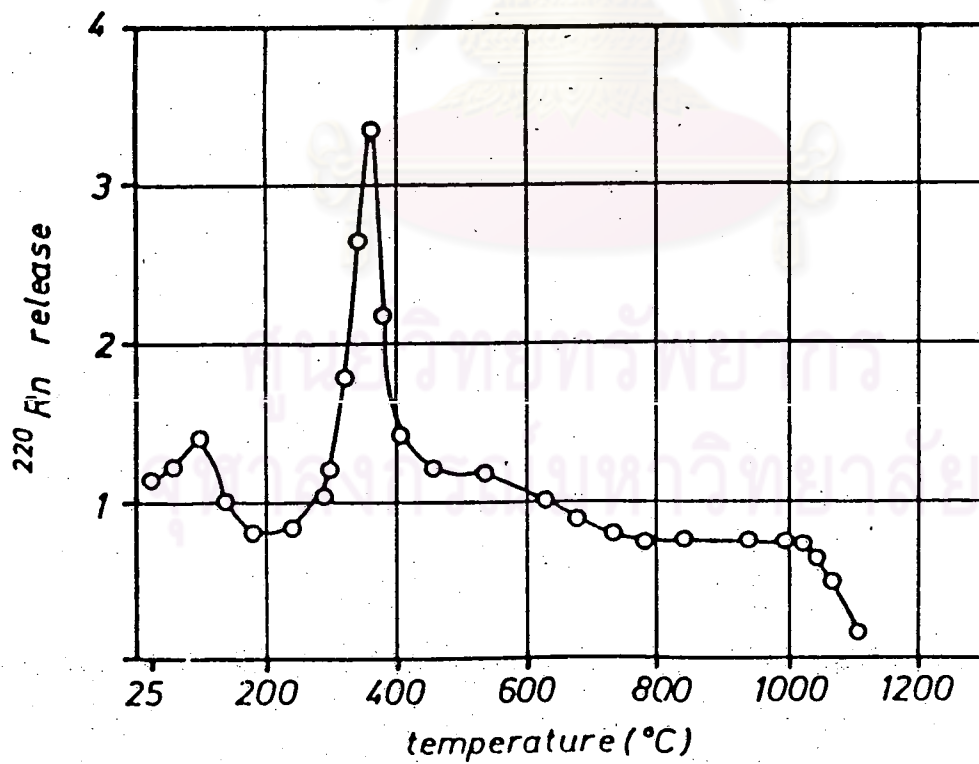
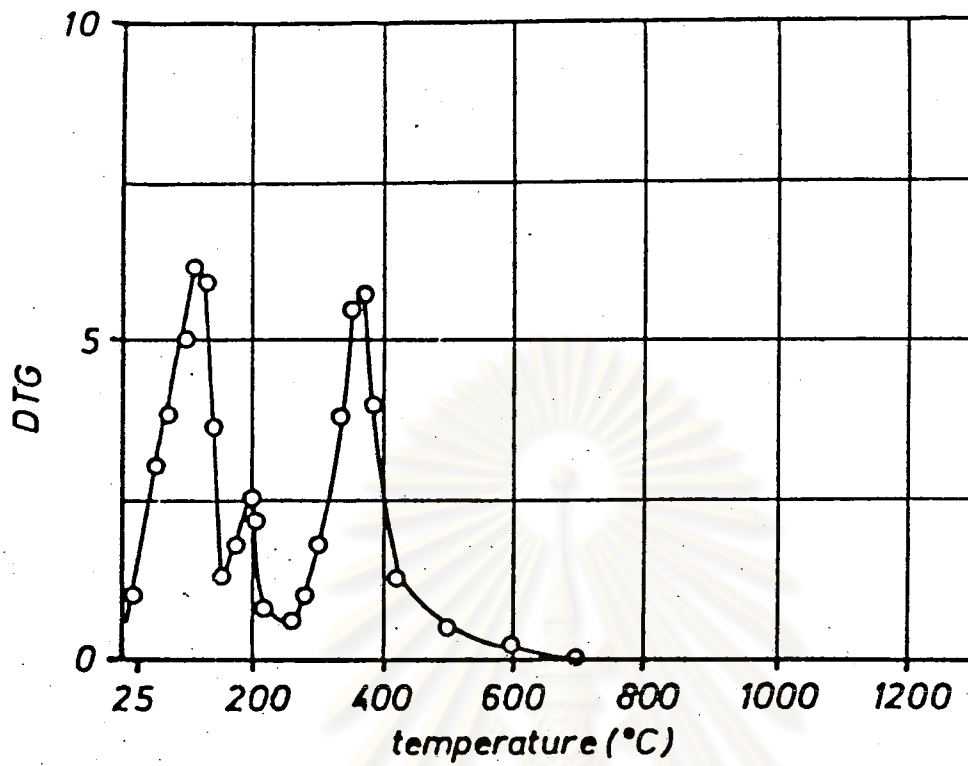
ขั้นตอนนี้เป็นกาจัดสารระเหยได้ที่ยังเหลืออยู่จากการล้าง (เมื่อทำเจเลชันโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีและความร้อน) และการทำเจเลชัน (เมื่อใช้วิธีดึงน้ำออก) นอกจากนี้ยังเป็นกาทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบางอย่าง เช่นการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของไมโครสเฟียร์และเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ได้

โซล-เจลไมโครสเฟียร์ที่ได้จากคอลลอยด์ จะมีสารประกอบที่ระเหยได้ เช่น น้ำ, โมโนเมอร์, ตัวทำละลายอินทรีย์, เซอร์เฟคแทนท์ปนอยู่มากมาย ซึ่งจะกำจัดออกไปได้โดยการใช้ความร้อน ด้วยวิธีการที่เหมาะสม การให้ความร้อนแก่ไมโครสเฟียร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในไมโครสเฟียร์ขึ้น เช่นมีการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้ผลึกใหญ่ขึ้น สำหรับยูเรเนียมจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์รูปต่าง ๆ ได้ด้วยการเผาที่สภาวะต่างกัน(10)



$\text{UO}_2$  เป็นสารประกอบรูปที่ไม่เสถียรของยูเรเนียม โดยเฉพาะเมื่อเป็นผงละเอียด และมีพื้นที่ผิวมาก (มากกว่า 10 ลูกบาศก์เมตร/กรัม) จะถูกออกซิไดซ์เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนและเกิดเป็น  $\text{U}_3\text{O}_8$

ในช่วงกาทำให้แห้ง ความร้อนที่ใส่จะทำให้ไมโครสเฟียร์เกิดการเปลี่ยนแปลงคือน้ำหนักลดลงเนื่องจากน้ำถูกกำจัดออกไป ซึ่งสำหรับยูเรเนียมจะเกิดในช่วงอุณหภูมิ  $80^\circ-220^\circ$  เซลเซียส ส่วนแอมโมเนียระเหยออกไปในช่วงอุณหภูมิ  $250^\circ-400^\circ$  เซลเซียส(11) ดังจะเห็นได้จากรูป 2.1 สารอินทรีย์ที่เหลืออยู่สามารถกำจัดออกไปด้วยอัตราต่างกันที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของกาเผา R. Breschi(12) พบว่า ที่อุณหภูมิ  $500^\circ-600^\circ$  เซลเซียส จะเกิดการหดตัวของคริสตัลไลน์ คลัสเตอร์ (crystalline cluster) โดยที่ขนาดของผลึกไม่เปลี่ยนแปลง แต่ขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นและขนาดของรูพรุนจะลดลง สำหรับ Suzuki(13-14) พบว่า ที่อุณหภูมิ  $675^\circ$  เซลเซียส



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมของ  $\text{UO}_2$  - เจลขณะให้ความร้อนในบรรยากาศของ  $\text{Ar}-4\% \text{H}_2(11)$



จะมีการหดตัวของไมโครสเฟียร์ เนื่องจากเกิดการจับตัวใหม่ของเกรน (grain) และการเลื่อนตัวแบบพลาสติก ช่วงอุณหภูมิประมาณ  $750^{\circ}$ - $800^{\circ}$  เซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (volume diffusion) และที่อุณหภูมิสูงกว่า  $800^{\circ}$  เซลเซียส จะมีการจัดเรียงตัวจนขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากให้ความร้อนไมโครสเฟียร์จนอุณหภูมิถึง  $1400^{\circ}$  เซลเซียสแล้ว โครงสร้างของสารจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นและรูพรุนเล็กลง ความหนาแน่นของไมโครสเฟียร์จะสูงขึ้น

### 2.3 การทำหยดไซลเพื่อให้ได้เจลสเฟียร์-แพคตามต้องการ(5) (Application of Drop Formation Procedure To Meet Gel-Sphere-Pac Requirements)

สำหรับสารเริ่มต้นป้อน (feed) ปริมาณออกไซด์โลหะในสเฟียร์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จะหาได้จากขนาดของหยดไซลหรือหยดบรอกก่อนเกิดเจลเลชัน จะต้องสามารถคาดคะเนและควบคุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดได้เพื่อจะได้สามารถผลิตสเฟียร์จากไซลหรือบรอกที่มีสมบัติต่างกันได้ตามต้องการ ในกระบวนการเจลเลชันเพื่อเตรียมสเฟียร์ต้องการไซลหรือบรอกที่มีสมบัติเหมือนกันและจะไม่ขึ้นกับเทคนิคในการทำเจลเลชัน การทำเป็นหยดเริ่มจากสารตั้งต้นไหลผ่านภาชนะที่มีปลายเล็ก ๆ หรือท่อรูตีบ การทำให้เป็นหยดจากสารตั้งต้นสามารถทำได้หลายวิธี จะขอกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้กันมาก 4 วิธี ดังนี้

#### 2.3.1 การใช้น้ำหนักกด (Drop Weight Mechanism)

ทำให้เกิดหยดอย่างช้า ๆ จากปลายรูตีบที่เบี่ยงหรือปากท่อที่แห้งและใช้ในการวัดหาแรงตึงภายใน (interfacial tension) หรือแรงตึงผิว (surface tension) โดยอาศัยทฤษฎีที่ว่าของเหลวจะแยกเป็นหยดเมื่อแรงตึงดูดเท่ากับความตึงผิวที่เส้นขอบเบี่ยง ในทางปฏิบัติจำเป็นจะต้องหาองค์ประกอบเพื่อแก้ค่าบางอย่าง นอกจากนี้การหยดยังผันแปรได้เนื่องจาก

(1) มีสารพวกเซอร์เฟส แอคทีฟ อยู่ในระบบ ซึ่งทำให้แรงตึงผิวของผิวหน้าของสเฟียร์ที่เกิดขึ้นใหม่ผันแปรไปตามเวลา

(2) พลังงานจลน์หรือโมเมนตัมของของเหลวที่เติมลงไป เพื่อเพิ่มน้ำหนักของหยดไซล

(3) การไหลอย่างต่อเนื่องของของเหลว เพื่อเกิดเป็นหยด จนกระทั่งของเดิมหยดลงไปจากปลายรูเข็มจึงฟอร์มหยดใหม่ขึ้น

การทำหยดไซลโดยวิธีนี้สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเดียวกันได้จากเครื่องมือง่าย ๆ ใช้ประโยชน์ได้กับการทดลองขนาดเล็ก ใช้ได้ไม่ติดกับการนำไปทำเป็นงานประจำ ในการเตรียม เชื้อเพลิงแบบสเฟียร์-แพค (sphere-pac) ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ

- 1) เตรียมได้เฉพาะสเฟียร์ขนาดใหญ่สุด ในทางทฤษฎีเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดเท่ากับเศษ 1 ส่วน 3 ของเส้นผ่าศูนย์กลางปลายท่อ และในทางปฏิบัติใช้ไม่ได้สำหรับสเฟียร์ขนาดเล็กกว่า 300 ไมโครเมตร
- 2) ความดันในการหยดและอัตราการไหลของบรอตหรือไซลค่า ภาชนะใส่ฟีด (feed) แบบที่มีท่อหลาย ๆ อัน สามารถทำได้ง่ายแต่จะมีปัญหาตามมาคือ จะมีการอุดตันของท่อซึ่งจะเป็นผลต่อขนาดของหยดไซล
- 3) เส้นผ่าศูนย์กลางของปากท่อ เป็นตัวแปรอิสระ เท่านั้นที่ใช้สำหรับการควบคุมขนาดของหยดไซลหรือบรอต ในขณะที่เราไม่อาจวัดหรือคาดคะเนความตึงผิวได้และเป็นเรื่องยากสำหรับวิธีนี้จะควบคุมและผลิตให้ได้เส้นผ่าศูนย์กลางความต้องการ ดังนั้นเมื่อต้องการเปลี่ยนขนาดของสเฟียร์จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนท่อ
- 4) การใช้ 2-ฟลูอิด นอชซัล อันเดียวด้วยการเขย่าหรือใช้ท่อหลาย ๆ อัน โดยมีอัตราการไหลเท่า ๆ กัน 2-ฟลูอิด นอชซัล จะให้หยด (drop) ขนาดใกล้เคียงกันได้มากกว่า คาดคะเนผลได้ดีกว่าและควบคุมขนาดของหยดได้ง่ายกว่ามาก ทฤษฎีที่ใช้สำหรับคำนวณโดยการใช้น้ำหนักกวดหาได้จากสมการข้างล่างคือ

$$D = (6 dr / \Delta p g)^{1/3}$$

เมื่อ

$$D = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของหยด}$$

$$d = \text{เส้นขอบ เบี่ยงปลายท่อ}$$

$$r = \text{ความตึงผิว}$$

$$\Delta p = \text{ความแตกต่างของความหนาแน่น}$$

$$g = \text{ค่าคงที่เนื่องจากแรงดึงดูด}$$



ในทางปฏิบัติ อัตราการเกิดหยด โดยทั่วไปแล้ว  $D$  จะมีค่าระหว่าง 80-120 เปอร์เซ็นต์ ของค่าที่คาดคะเนได้จากสมการ การจะให้ได้ผลดีต้องกำหนดค่า  $d$  เป็นอย่างดี ถ้าหากใช้ ปลายรูฉีดยาที่เบี่ยง เป็นเครื่องทำหยดค่า  $d$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของปลายรูฉีดยาเมื่อใช้ อัตราการเกิดหยดค่า และ  $d$  จะเป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของปลายรูฉีดยา เมื่อใช้อัตราการไหลสูง การใช้ท่อที่อยู่ในสถานะที่ผิวหน้าเป็นพลาสมาบาง ๆ และไม่เบี่ยง ค่า  $d$  จะเท่ากับ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อและยังมีการลดต้นของท่อน้อยกว่าการใช้รูฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายในเท่ากันอีกด้วย

### 2.3.2 การใช้ลามินาร์ เบรคอัพของเจต (Laminar Breakup of Jets)

โซลหรือบรอนท์ที่พุ่งออกมาจากภาชนะปลายเล็ก ๆ ที่สภาวะความหนืดหรือ การไหลแบบลามินาร์จะกระจายไปในช่วงระยะสั้น ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดหยดที่เป็นทรงกลมเนื่องจาก ความตึงผิว เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดที่ได้โดยทั่วไป มีค่าประมาณ 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง และเกิดจากเจตที่มีความยาวเป็น 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง การกระจายจากเจตแบบนี้เกิด กับเจตที่มีความเร็วสูง ๆ ที่ปราศจากสิ่งรบกวน

การจะทำเจต เบรคอัพให้ได้ผลดีที่สุดในการเตรียมสเปรย์ จำเป็นที่จะต้อง ใช้วิธีการที่สามารถลดปัญหาเหล่านี้ คือ

1. การ เบรคอัพของเจตขึ้นอยู่กับขนาดของการรบกวนผิวและการกระจาย ตัวเนื่องจากตำแหน่งของการเบรคอัพมีผลต่อขนาดของสเปรย์ การใช้การ เบรคอัพแบบธรรมดา ที่สุดเท่าที่จะทำได้ จะทำให้ได้สเปรย์ที่มีขนาดเท่า ๆ กัน

2. ขณะที่ความหนืดของโซลเพิ่มขึ้น ความยุ่งเหยิงในการ เบรคจะช้าลง จึงจำเป็นต้องใช้เวลาและระยะทางมากและจะถูกรบกวน จากการรบกวน (disturbances) ประเภทอื่น ๆ

3. สภาวะที่ทำให้เกิดการหยดที่ละหยดติดต่อกัน มักจะมีผลให้เกิดการรวม กันทำให้ได้หยดที่มีขนาด 1.26 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหยดเดิม

4. ถ้าขนาดของท่อที่ใช้ทำ เจต เป็นตัวแปรอย่าง เดียว การควบคุมขนาดของหยดทำได้ลำบาก ดังนั้นจึงควรใช้นอซซิลที่สามารถเปลี่ยนได้

5. หยดกลายเป็นเจลในของเหลวอินทรีย์ เจตที่จุ่มในของเหลว เพื่อที่จะลดความเร็วของของเหลว (หรือมีฉะนั้นก็เพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเจต) ถ้าทำให้เกิดการหยดในก๊าซ จะกระเด็นและติดกันที่ผิวของของเหลว

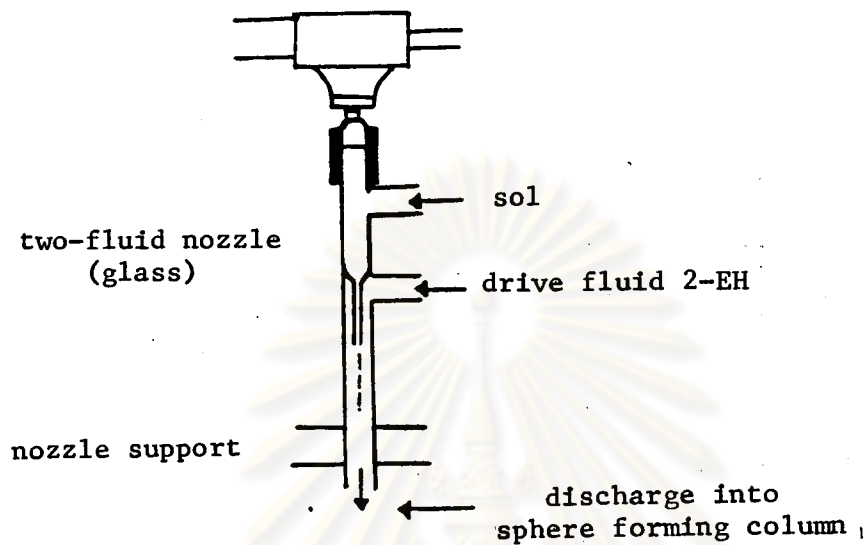
#### 6. เกิดการอุดตันของปลายเจต

เทคนิคหนึ่งที่ได้ผลก็คือการทำให้เจตสั่น (Vibrate) เพื่อควบคุมการเบรคอัพ ซึ่งอาจทำได้โดยการเขย่าปลายเจต หรือโดยการสั่นของเหลวที่ไหลผ่านเจต ความถี่ของการเกิดหยดจะใกล้เคียงกับความถี่ของการเบรคอัพ ดังที่กล่าวแล้วข้างบน การสั่นจะช่วยแก้ปัญหาคือ 1, 2 และ 4 การทำให้ของเหลวสั่นจะช่วยลดการอุดตันที่ปลายเจต การที่จะทราบความถี่ (frequency) ของการเบรคอัพ จะต้องทราบอัตราการไหลของของเหลวและเส้นผ่าศูนย์กลางของเจต

เทคนิคอื่นที่ใช้ได้ผลก็คือการใช้ ฟลูอิดนอซซิล 2 อัน (2-fluid nozzle) โดยให้ฟลูอิดันเป็นวงแหวนรอบเจต อัตราเร็วของการดันของฟลูอิดและเจตไม่ควรแตกต่างกันมากนัก การใช้ของเหลวดันฟลูอิดจะช่วยควบคุมปัญหาคือ 3 และ 5 การเพิ่มขนาดของท่อ (channel) ที่จะดันให้ฟลูอิดไหลลงมาจะช่วยแก้ปัญหาคือ 1 และ 2 ขนาดของเจตสามารถแปรผันได้ด้วยการเพิ่มหรือลดการไหลของฟลูอิด ซึ่งเป็นการควบคุมขนาดของเจตและหยดด้วย โดยไม่ต้องเปลี่ยนนอซซิล การไหลของฟลูอิดจะต้องเป็นแบบลามินาร์หรือวิสคัส (viscous) การไหลผ่านของฟลูอิดอาจทำให้เจตแตกได้ เราอาจแก้ปัญหาคือการอุดตันที่ปลายเจตได้ โดยการให้เจตขนาดใหญ่กว่าพร้อมกับให้ความเร็วของการไหลของฟลูอิดที่ดันสูงกว่าความเร็วของการผ่าน (jet velocity) เพื่อเร่งการพ่นและให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง เล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

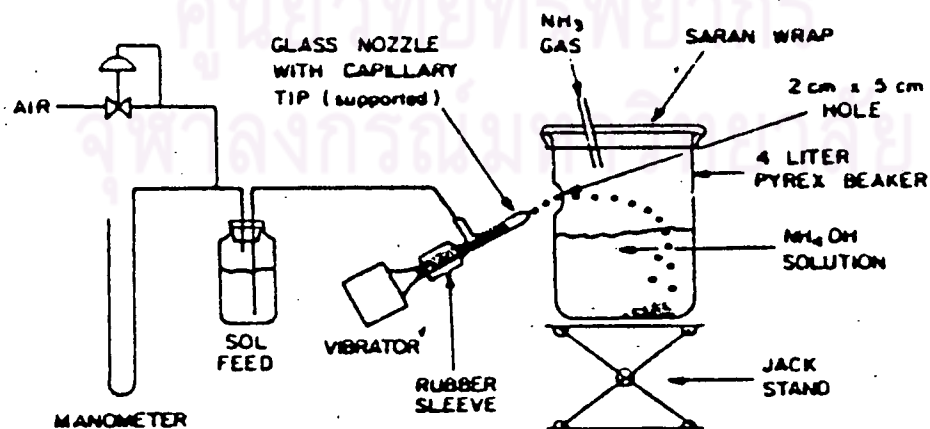
#### 2.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในลามินาร์เจต เบรคอัพ

เทคนิคการทำให้เกิดหยดดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องมือได้หลายอย่าง เจตของไซลหรือบรอตจะถูกป้อน (feed) ผ่านใจกลางของท่อหรือรูตีปที่มีผนังบางโดยมีฟลูอิดไหลเป็นวงแหวนล้อมรอบเจต ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการสั่น ใส่คลื่น



รูปที่ 2.2 เครื่องมือลารมินาร์เจท-เมอร์คัพ (5)

ONAL DWG 77.2253

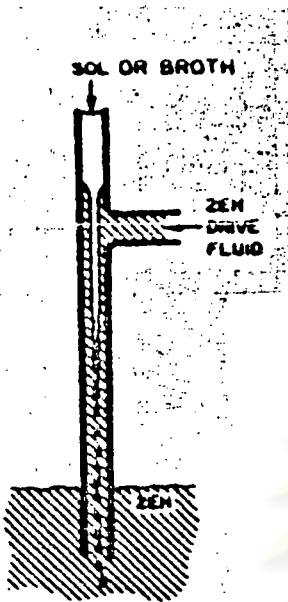


รูปที่ 2.3 เครื่องมือทำให้เกิดหยดในก๊าซโดยไม่ต้องใช้ฟลูอิดช่วยพาลงมา (5)

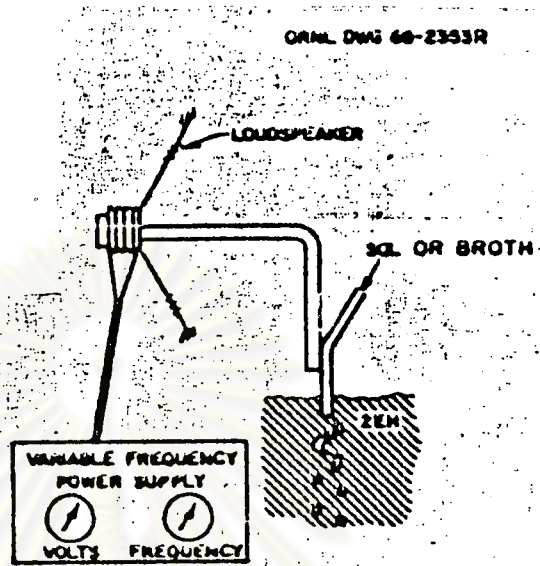
รูปไซน์ (sine wave) ที่สามารถควบคุมความถี่ได้ เข้าไปในเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ไวเบเรเตอร์ การเคลื่อนที่ของไวเบเรเตอร์จะถ่ายทอดไปยังเจตแคพิลลารี (jet capillary) เครื่องมือที่ใช้ที่ ORNL เป็นดังรูป 2.3 และเครื่องมืออย่างง่ายที่ใช้ในการทำให้เกิดหยดในก๊าซโดยไม่ต้องมีฟลูอิดช่วยไหลลงมา แสดงในรูป 2.4 การใช้ไวเบเรเตอร์อันเดียวหรือฟลูอิดไหลที่ขับเคลื่อนทางเดียว (single drive fluid flow) สามารถใช้ได้กับเจตหลาย ๆ อัน อย่างไรก็ตามมักจะใช้เจตโดยมีเครื่องวัดอัตราการไหลของไหลหรือบรอกแยกเฉพาะตัว ขณะที่การแบ่งส่วนไม่เท่ากันของขนาดหยดที่ไม่เท่ากันอย่างช้า ๆ เกือบจะเป็นผลเมื่อเครื่องมืออยู่ในแนวขนาน ถูกม้วนเข้ามาด้วยฟีดสตรีม (feed stream) การไวเบเรตสามารถประยุกต์ใช้เข้าไปเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ โดยวิธีอื่น ๆ อีกด้วย วิธีเหล่านี้ เช่น

- 1) การสั่นโคอะแฟรมในท่อที่ติดกับนอซซิล
- 2) การสั่นยางหรือท่อพลาสติกที่ยึดอยู่ระหว่างทั้ง (anvil) กับ เครื่องสั่น (vibrator)
- 3) การเคลื่อนนอซซิลทั้งหมดดังแสดงในรูป 2.4 โดยประกบนอซซิลเข้ากับไวเบเรเตอร์ให้แน่น (เคลื่อนที่ในแนวรอบแกน)
- 4) การเคลื่อนท่อรูตีบจากที่ซึ่ง เจตถูกปล่อยออกมาในแนวทะแยงกับแกน (รูป 2.5 (b))
- 5) ผ่านไฟฟ้ากระแสสลับให้กับเจต (รูป 2.5 (d))

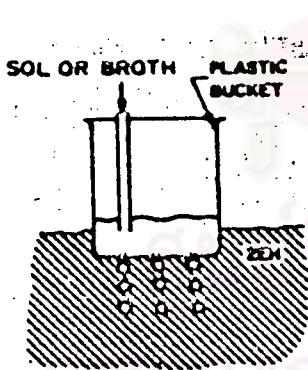
วิธีทั้งหมดนี้สามารถทำให้เกิดการกระจายในลักษณะเดียวกันที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ตามธรรมชาติของการกระจายด้วยเจต และให้ผลน้อย เมื่อความแตกต่างจากความถี่โดยธรรมชาติเพิ่มขึ้น การจัดเครื่องมือดังแสดงในรูป 2.4 เชื่อกันว่ามีความไวต่อเรโซแนนซ์ของเครื่องมือน้อยกว่าการจัดแบบอื่น ๆ และให้ผลดีที่พลังงานที่ให้ต่ำมาก ๆ การไหลของโดรฟ. ฟลูอิดจะพาเอาหยดจากนอซซิลให้ไหลลงไปในสลิวิตที่ซึ่งจะเกิด เจ เลชันอย่างสมบูรณ์ ขณะที่การจัดแบบอื่น (รูป 2.4, 2.5 (b) และ (d)) ไม่อาจเกิดได้



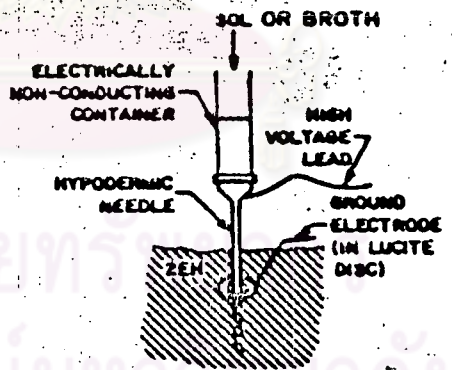
a. 2-ฟลูอิด-นอชซัล



b. ไวเบรท แคทลารี



c. การตกลอยังอิสระหรือ "SOCKET" ด้วย เครื่องมือหลายอัน



d. นอชซัลด้วยไฟฟ้า

รูปที่ 2.4 เครื่องมือที่ใช้คัสเพอซโซลหรือบรอตลงใน 2-EH (5)

ความถี่โดยธรรมชาติของการกระจายแบบลามินาร์ การไหลของไหลหรือบรอกสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตร (volume flow rate) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง สำหรับการใช้ก๊าซพื้น (รูป 2.4) เส้นผ่าศูนย์กลางของเจทเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของปลายรูตีบ สำหรับลิควิดโครว์ฟลูอิด (รูป 2.3) เจทถูกเร่งให้เร็วขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางจะคำนวณได้จากความเร็วและอัตราการไหลของฟีด ความเร็วในแนวศูนย์กลางสำหรับการไหลแบบลามินาร์จะเป็น 2 เท่าของความเร็วเฉลี่ย ความถี่ตามธรรมชาติของการกระจายจะสอดคล้องกับความยาวของเจทประมาณ 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังนั้นความถี่มีค่าเท่ากับความเร็ว/(5xเส้นผ่าศูนย์กลาง) สำหรับฟลูอิดนอซซึล 2 อัน เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดไหลจากความสัมพันธ์ข้างบนมีค่าเท่ากับ  $1.4 ID(R)^{1/2}$  เมื่อ ID เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของช่องโครฟ ฟลูอิด และ R เป็นอัตราส่วนของไหลต่อการไหลของฟลูอิด จากการคูณปริมาตร อัตราการเกิดหยดคูณกับปริมาตรของหยดจะต้องเท่ากับอัตราการไหลของฟีด

#### 2.3.4 ก๊าซพื้นแบบเทอร์บูเลนต์ด้วย 2-ฟลูอิดนอซซึล (Turbulent Breakup in Two-Fluid Nozzles)

ในทางปฏิบัติการทำสเปียร์ขนาดเล็กต้องการการการเกิดหยดที่มีอัตราเร็วสูง (ตาราง 2.3) และลามินาร์เจทเบอร์ค็อท หรือการใช้น้ำหนักทำให้เกิดหยดไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิต

กลไกที่ใช้ในการทำให้เกิดหยดมีพื้นฐานมาจากการไหลอย่างเทอร์บูเลนต์ของโครฟฟลูอิด ใน 2-ฟลูอิดนอซซึล ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการผลิตสเปียร์ขนาดเล็ก ไหลหรือบรอกจะถูกกระจายให้เป็นหยดด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยขึ้นเท่ากับ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อและความเร็วของฟลูอิด เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยจะถูกควบคุมโดยการปรับอัตราการไหลของโครฟ-ฟลูอิด เทอร์บูเลนต์นอซซึลจะให้ช่วงของขนาดแคบกว่า ละเอียดยกกว่าการใช้เครื่องผสม (mixer) หรือสเปร์ย์-นอซซึล (spray nozzle) การเกิดหยดจะเกิดในดิวกลางอินทรีย์ ซึ่งให้ประโยชน์ต่อสเปร์ย์-นอซซึลหรือสไปนนิ่ง ดิสก์ อะตอมไมเซอร์ (spinning disk atomizers) ในก๊าซ การหาเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของหยดไหล อาจทำได้จากความสัมพันธ์ข้างล่าง



$$\frac{D_s}{DN} = \frac{3.4}{(We)\rho \cdot \sigma} = 3.4 \left( \frac{\sigma}{DN V^2 \rho} \right)^{\rho-6}$$

เมื่อ

$D_s$  = เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของหยดไซล

$DN$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของซัล

$V$  = ความเร็วในของซัล เป็นผลรวมของการไหลของบรอกกับสารอินทรีย์

$We$  = เลข เวเบอร์

$\rho$  = ความหนาแน่นของสารอินทรีย์

$\sigma$  = ความตึงผิวของน้ำที่เกิดหยด

ความตึงผิวที่เวลาต่าง ๆ ขึ้นกับสาร เซอร์เฟส แอคทีฟ ที่มีอยู่ เรามักเติม เซอร์แฟคเตอร์ (Span 80) เข้าไปด้วย อย่างไรก็ตามการใช้เทอร์บูเลนต์ นอซซัล จะทำให้เกิดหยดเร็วมากก่อนที่ความเข้มข้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะใช้ค่าความตึงผิวดังนี้

45 mN/m	สำหรับ	TCE
15 mN/m	สำหรับ	2EH
4 mN/m	สำหรับ	isoamyl alcohol

เส้นผ่าศูนย์กลางของหยดบรอกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดของบรอกเพิ่มขึ้นและจะแก้ค่าความสัมพันธ์ข้างบนโดยการแทนค่าคงที่ 3.4 ด้วย  $3(\mu_s/\mu_o)^{0.2}$  เมื่อ  $\mu_s$  และ  $\mu_o$  เป็นความหนืดของบรอกและสารอินทรีย์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sintered Sphere Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Sphere Mass ( $\mu\text{g}$ )	Drop formation rate, drops/s	
		For 0.1 kg/h product	For 10 kg/h product
900	3820	7.3	730
300	141	196	$19.6 \times 10^3$
100	5.24	5300	$530 \times 10^3$
33	0.194	$1.4 \times 10^5$	$14 \times 10^6$

ตาราง 2.1 แสดงอัตราเร็วของการเกิดหยด(5)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย