บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้น

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์หลักที่จะทำการศึกษาประสิทธิภาพของตาข่ายเปียกในการจับเก็บฝุ่นจากโรงโม่หิน โดยมุ่งเน้นอนุภาคฝุ่นที่เกิดจากอุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน อุตสาหกรรมดังกล่าวเป็นต้นเหตุที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศอันเนื่องมาจากมีปริมาณฝุ่นจำนวนมากที่ฟุ้งกระจายออกมาจากกระบวนการโม่ บด และย่อยหิน ในเบื้องต้นจะขอกล่าวถึงศัพท์บางคำที่เกี่ยวกับงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้มีความหมายและความเข้าใจตรงกัน จากนั้นจึงกล่าวถึงอันตรายของฝุ่นต่อสภาพแวดล้อม และอันตรายต่อสุขภาพของคนงานที่ทำงานอยู่ในโรงโม่หิน และชุมชนที่อยู่รอบๆโรงโม่หิน ตลอดจนขั้นตอนหรือกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน จุดที่เป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นในกระบวนการโม่ บด และย่อยหิน และวิธีการควบคุมฝุ่น นอกจากนี้จะกล่าวถึง กลไกหลักในการจับเก็บฝุ่นด้วยของเหลว มาตรฐานของความเข้มข้นฝุ่น ตลอดจนการใช้ความทึบแสงในการประเมินความเป็นมลพิษของอนุภาคมลสาร

2.1 <u>คำศัพท์และความหมาย</u>

มีศัพท์หลายคำที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ และเกี่ยวกับอนุภาคฝุ่น รวมถึงมลพิษทางอากาศที่สมควรอธิบายความหมายเพื่อให้มีความเข้าใจตรงกัน คำศัพท์เหล่านี้ในวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีความหมายใกล้เคียงกัน Howard E. Hesketh (1974) ได้ให้ความหมายของศัพท์เหล่านี้ไว้ดังนี้

- **วัสดุอนุภาค** (Particulate Matter) คือ วัตถุหรือสสารที่เป็นของเหลวหรือของแข็งใดๆ ที่อยู่ในอากาศ ซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.0002 – 500 ไมโครเมตร

- **ฝุ่น** (Dust) คือ อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการแตกตัว การถูกบดอัด หรือการสลายตัวที่เกิดจากกระบวนการทางกล โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึงหลายร้อยไมโครเมตร อนุภาคฝุ่นโดยทั่วไปมีรูปร่างของอนุภาคที่ไม่แน่นอน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **มลพิษอากาศ** (Air Pollution) คือ การดำรงอยู่ของสสารหรือวัตถุผิดปกติ (Abnormal) ในอากาศหรือบรรยากาศที่เป็นผลให้เกิดอันตรายหรือผลร้ายต่อสุขภาพหรือสวัสดิภาพของสิ่งมีชีวิต

องค์การป้องกันสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (U.S. Environment Protection Agency,1995) ได้ให้ความหมายของศัพท์ที่อธิบายถึงขนาดของอนุภาคต่างๆ ที่นิยมเขียนเป็นสัญลักษณ์ในภาษาอังกฤษ ดังนี้

- TSP (จำนวนอนุภาคทั้งหมดที่แขวนลอยในบรรยากาศ, Total Suspended Particulate) คือ จำนวน (ปริมาณ) ของอนุภาคที่สามารถถูกเก็บตัวอย่าง และตรวจวัดได้โดยเครื่องเก็บตัวอย่างชนิดปริมาตรสูง TSP มีช่วงของขนาดอนุภาคค่อนข้างกว้าง จากการทดสอบในอุโมงค์ลม เครื่องเก็บตัวอย่างชนิดปริมาตรสูงสามารถเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ได้ตั้งแต่เกือบ 100 % จนกระทั่งสามารถเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับ 100 ไมโครเมตรได้เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เพราะว่าเครื่องเก็บตัวอย่างชนิดปริมาตรสูงมิได้มีการบ่งชี้ถึงช่วงของขนาดอนุภาคที่เก็บตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม U.S.EPA ได้ระบุถึงค่าจุดตัดประสิทธิผลของขนาดอนุภาค (Effective Cut Point) ที่สามารถเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ได้เท่ากับ 30 ไมโครเมตร

- PM_{10} คือ อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์เล็กกว่า 10 ไมโครเมตร

U.S. EPA (1992) ได้ให้ความหมายของศัพท์ที่เกี่ยวข้องถึงการจำแนกฝุ่นจากโรงโม่หิน ดังนี้

- **ฝุ่นจากแหล่งกระบวนการ** (Process Source) คือ ฝุ่นที่สามารถดักจับและควบคุมได้โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม

- **ฝุ่นเล็ดลอด** (Fugitive Dust) คือ ฝุ่นบนพื้นหรือที่เกาะติดอยู่ตามเครื่องจักร ซึ่งถูกทำให้ฟุ้งกระจายในอากาศโดยลม การเคลื่อนไหว หรือการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

นอกจากนี้ยังมีศัพท์สำคัญที่เกี่ยวข้องในงานวิทยานิพนธ์ ดังนี้

- **โรงโม่หิน** (Stone Processing Plants) คือ สถานประกอบการที่ทำการ โม่ บด และย่อยหิน พร้อมทั้งคัดขนาด เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

- **ตาข่ายเปียก** (Wetted Screens) คือ อุปกรณ์ที่ใช้จับเก็บฝุ่น โดยการปล่อยน้ำให้ไหลลงมาเคลือบผิวตาข่าย (ม่านน้ำ) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจับเก็บฝุ่น โดยอาศัยกลไกการเปิดและปิดของรูเล็กๆบนม่านฟิล์มน้ำบริเวณช่องตาข่ายอย่างฉับพลัน

2.2 <u>อันตรายของฝุ่น</u> (Dust Hazard)

กระบวนการผลิตหินของโรงโม่หิน ไม่ว่าจะเป็นการโม่ บด หรือ ย่อยหิน ล้วนมีศักยภาพสูงในการก่อให้เกิดฝุ่นในปริมาณที่สูง ฝุ่นเหล่านี้ได้ก่อให้เกิดอันตรายและผลเสียต่างๆ ต่อคนและสิ่งแวดล้อมตามมาอย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถจำแนกอันตรายของฝุ่นได้เป็น 2 ประเภท ตามผลที่เกิดตามมา ดังนี้

2.2.1 อันตรายของฝุ่นต่อสุขภาพ

อันตรายนี้จะมีผลทั้งคนงานที่ทำงานอยู่ในโรงโม่หิน ผู้ประกอบการ ชุมชนที่อาศัยอยู่บริเวณโดยรอบโรงโม่หิน โดยเฉพาะเขตที่มีโรงโม่หินตั้งอยู่เป็นจำนวนมาก และรวมถึงผู้ที่เดินทางสัญจรไปมาผ่านโรงโม่ ฝุ่นละเอียดที่ฟุ้งกระจายและแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ จะส่งผลให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อดวงตา และที่สำคัญที่สุดคือ เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและปอดเมื่อเกิดการสะสมอย่างต่อเนื่อง (กมล ธนะนพวรรณ, 2540)

2.2.1.1 กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อฝุ่นละอองเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ

ฝุ่นจะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจโดยการหายใจ อากาศที่หายใจจะเข้าสู่จมูก คอ ผ่านสู่หลอดลม ขั้วปอด และจากขั้วปอดจะแยกออกสู่ปอดทั้งสองข้างและกระจายออกเป็นท่อเล็ก ท่อฝอย และถุงลมปอดเป็นที่สุด ที่ถุงลมปอดจะมีเส้นเลือดฝอยและท่อน้ำเหลืองอยู่รอบ ๆ ด้วย

แต่ละส่วนของระบบทางเดินหายใจจะมีกลไกในการป้องกันที่จะดักจับสิ่งแปลกปลอมที่เข้ามากับอากาศที่เราหายใจอยู่ อนุภาคของฝุ่นขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตร) ส่วนใหญ่จะถูกดักจับภายในช่องจมูกและคอ ฝุ่นที่สามารถลอดผ่านไปได้บางส่วนจะถูกจับโดยการคัดหลั่งน้ำเมือกออกจากผิวของหลอดลมและท่อลมสาขา เมือกและอนุภาคที่ถูกจับเหล่านี้จะถูกดันขึ้นมาโดยขนขนาดเล็ก (Hairs or Cilia) จำนวนมากที่ทำให้เมือกหรือเสมหะเหล่านี้เคลื่อนที่ออกมาจากหลอดลม ด้วยอัตราความเร็วครึ่งนิ้วต่อนาที และจะถูกขับออกในที่สุด อนุภาคที่เหลือที่เล็กกว่านี้ซึ่งส่วนใหญ่จะเล็กกว่า 5 ไมโครเมตรอาจจะผ่านเข้าสู่ถุงลมปอดในที่สุด ที่นี่จะมีเซลล์ชนิดหนึ่งที่เคลื่อนที่ได้เก็บกวาดอนุภาคที่หลุดเข้ามา (Mobile Scavenger Cell) เรียกว่า Phagocyte ซึ่งจะดูดกลืนอนุภาคเหล่านี้และนำอนุภาคเหล่านี้ออกไปยังหลอดลมฝอยซึ่งจะถูกผลักดันออกไปโดยขนขนาดเล็กในที่สุด แต่อนุภาคบางส่วนที่เหลืออยู่จะผ่านทะลุถุงลมปอดและฝังตัวอยู่ในเนื้อเยื่อปอด และจะทะลุเข้าท่อน้ำเหลืองไปยังต่อมน้ำเหลืองซึ่งทำหน้าที่คล้ายตัวกรองซึ่งฝุ่นจำนวนหนึ่งจะติดอยู่ที่นั่น อนุภาคอีกบางส่วนจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาเส้นใยหรือการเกิดขึ้นของเยื่อเหนียวหรือ เยื่อพังผืดที่ปอดซึ่งจะเกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อที่ฝุ่นฝังตัวหรือติดอยู่ ส่วนอนุภาคที่เหลือซึ่งโดยมากมีขนาดเล็กมากจะออกมากับลมหายใจออก

2.2.1.2 ผลร้ายของฝุ่นละอองต่อระบบทางเดินหายใจ

ฝุ่นละอองโดยทั่วไปจะมีผลต่อร่างกายมากน้อยเพียงใด ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของฝุ่น ปริมาณที่ได้รับ ระยะเวลาที่สัมผัส ความแข็งแรงของสุขภาพ หรือภูมิต้านทานของผู้ที่สูดเข้าไป

- โรคภูมิแพ้ (Allergic Reaction) โรคภูมิแพ้เกิดขึ้นโดยการหายใจเอาฝุ่นบางชนิดเข้าไปแล้ว เกิดการกระตุ้นที่เนื้อเยื่อ ทำให้ปล่อยเยื่อเมือกออกมาห่อหุ้ม และค่อยๆ ขับออกมาโดยขนเล็ก ๆ การสะสมของฝุ่นอยู่ที่ผิวของระบบทางเดินหายใจจะทำให้ระบบทางเดินหายใจเกิดอาการภูมิแพ้ขึ้นชั่วครั้งชั่วคราวแต่เป็นอาการที่ไม่รุนแรงมาก

- นิวโมโคนิโอซีส (Pneumoconiosis) หมายถึง ปอดที่มีอาการผิดปกติหรือโรคปอดที่เกิดจากการหายใจเอาฝุ่นอนินทรีย์ (Inorganic Dust) จากบรรยากาศเข้าไปสะสมในปอด ลักษณะของอนุภาคที่ทำให้เกิดนิวโมโคนิโอซีสนั้นจะเป็นเส้นใยค่อนข้างแข็งที่ติดอยู่กับปอด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการระคายเคืองต่อปอด ปอดจึงสร้างเยื่อเหนียวหรือเส้นใยมาห่อ ดังนั้นยิ่งหายใจ

เอาฝุ่นเข้าปอดมากเท่าไร โอกาสที่จะเป็นโรคปอดแข็งหรือนิวโมโคนิโอซีสจะมากขึ้นเท่านั้น อนึ่ง ถ้าเป็นโรคปอดแข็ง ประสิทธิภาพการทำงานของปอดจะลดลง อาการขั้นแรกของโรค คือ หายใจลำบาก ฝุ่นที่ก่อให้เกิดโรคนี้มีหลายชนิด โรคที่เกิดขึ้นจะมีชื่อเรียกตามชนิดของฝุ่นที่ก่อให้เกิดโรค เช่น ซิลิโคซีส แอสเบสโทซีส เบอริลลิโอซีส เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงฝุ่นที่มีมากในเหมืองหิน และโรงโม่หิน คือ ซิลิโคซีส

- ซิลิโคซีส (Silicosis) เป็นโรคปอดที่เกิดจากการหายใจเอาฝุ่นทราย หรือฝุ่นซิลิกาเข้าไป เมื่อหายใจเอาฝุ่นซิลิกาที่เป็นผลึกแหลมคมเข้าไปสะสมอยู่ในปอด ปอดจะสร้างเยื่อพังผืดมาห่อหุ้มผลึกเหล่านั้นไว้ อาการของโรคนี้คือ หายใจลำบาก ต้องหายใจลึก ๆ สั้น ๆ ปริมาตรปอดลดลง เหนื่อยง่าย ทำงานได้น้อยลง อ่อนเพลีย ซึ่งอาจจะนำมาสู่การติดเชื้อวัณโรคได้ง่าย อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมโม่หินส่วนใหญ่จะมีซิลิกาในหินที่เป็นวัตถุดิบต่ำมากหรือไม่มีเลย

2.2.2 อันตรายของฝุ่นต่อสภาพแวดล้อม การทำงาน และการดำเนินชีวิต

มลพิษจากฝุ่นนอกจากจะก่อให้เกิดความรำคาญ รู้สึกระคายเคือง และลดการมองเห็น (Visibility) อันเป็นสาเหตุที่ทำให้ทำงานได้ไม่สะดวกและส่งผลให้ทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพแล้ว ฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการโม่ บด และย่อยหิน ยังเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆเสียหาย ซึ่งฝุ่นที่ก่อให้เกิดปัญหาเหล่านี้ได้แก่ ฝุ่นเกือบทุกขนาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งฝุ่นขนาดใหญ่ (กมล ธนะนพวรรณ, 2540) นอกจากนั้นยังมีฝุ่นจำนวนหนึ่งสามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานานและสามารถลอยไปได้ไกล ซึ่งถ้าบริเวณนั้นเกิดฝุ่นเป็นจำนวนมาก จะทำให้ลดการมองเห็นลงอย่างเห็นได้ชัด ทำให้บริเวณนั้นมืดลงและทำให้มีปัญหาในการสัญจรไปมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเช้ามืด และช่วงเย็นถึงค่ำ

ด้วยเหตุนี้บริเวณตำบลหน้าพระลาน จังหวัดสระบุรี ซึ่งมีโรงโม่หินตั้งอยู่เป็นจำนวนมาก ตลอดเส้นทางที่รถบรรทุกวัตถุดิบแล่นผ่าน จะมีสภาพของฝุ่นละอองฟุ้งกระจายทั้งบริเวณโรงงานและบ้านเรือนใกล้เคียง สภาพบ้านเรือนในตำบลนี้จะมีฝุ่นละอองจับพอกอยู่แทบทุกแห่ง

2.2.3 ผลกระทบอันเนื่องมาจากขนาดของฝุ่น

ขนาดของฝุ่นจะแปรผกผันกับผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจมนุษย์ โดยจะแบ่งตามขนาดเป็น 3 ขนาด (กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี , 2541) ดังนี้

2.2.3.1 ฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตร

ฝุ่นในช่วงขนาดนี้ส่วนใหญ่เมื่อแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้ไม่นานก็จะตกสู่พื้นดิน ถ้าเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ จะทำให้เกิดอาการ เช่น หายใจไม่สะดวก จาม คัดจมูก แต่จะไม่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจมากนัก ยกเว้นได้รับในปริมาณมากๆ และเป็นระยะเวลานาน แต่ฝุ่นขนาดนี้จะทำให้เกิดปัญหาต่อการมองเห็นอย่างมากอันนำมาสู่ปัญหาของการทำงาน การสัญจรและการทำงานของเครื่องจักร และจะทำให้ผู้ที่สัมผัสเดือดร้อนรำคาญอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อผิวหนัง หู และดวงตา

2.2.3.2 ฝุ่นที่มีขนาด 0.1 ถึง 10 ไมโครเมตร

ฝุ่นในช่วงขนาดนี้สามารถเข้าไปถึงส่วนลึกต่างๆ ของระบบทางเดินหายใจอันจะส่งผลต่ออวัยวะต่าง ๆ ภายในระบบ นอกจากนี้ฝุ่นขนาดนี้ไม่สามารถมองเห็นได้ที่ความเข้มข้นเจือจางด้วยตาเปล่า จึงทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าฝุ่นเหล่านี้ฟุ้งกระจายอยู่ในบริเวณใดบ้าง เป็นผลให้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงฝุ่นเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (แต่ละเม็ด) จะมีน้ำหนักน้อยมาก จึงสามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานานมาก และมีโอกาสที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ตลอดเวลา หากไปอยู่ในบริเวณที่มีฝุ่นเหล่านี้

ฝุ่นขนาดเล็กบางชนิดที่สามารถเคลื่อนตัวไปถึงปลายสุดของถุงลมปอด อาจจะก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรง ประเภทของฝุ่นที่อันตราย ที่มีโอกาสพบในอุตสาหกรรมโม่บด และย่อยหิน ได้แก่ ฝุ่นจากซิลิกาซึ่งส่วนใหญ่มาจากหินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) ซึ่งจะก่อให้เกิดโรคซิลิโคซีส ซึ่งทำให้เจ็บป่วยเรื้อรังจนถึงตายได้หรืออาจก่อให้เกิดโรคแทรกซ้อนอื่นๆ เช่น วัณโรค มะเร็ง เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่ผู้ประกอบการเหมืองหินและโรงโม่หินจะพยายามหลีกเลี่ยงหินที่มีแร่ซิลิกาอยู่แล้ว เนื่องจากหินที่มีแร่ซิลิกาหรือควอทซ์จะเป็นหินที่แข็งมาก ทำให้เครื่องโม่หินสึกหรอมาก อายุการใช้งานสั้นลง

2.2.3.3 ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร

ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตรนี้จะเป็นฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก จึงสามารถเคลื่อนตัวได้คล้ายก๊าซ (Mean Free Path = 0.1 ไมโครเมตร) ดังนั้นฝุ่นขนาดนี้จะเข้าหรือออกจากระบบทางเดินหายใจได้คล้ายก๊าซ และส่วนมากมักถือว่าเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจน้อยมาก

2.3 โรงโม่หินและกระบวนการผลิต

ไม่มีใครสามารถปฏิเสธได้ว่าอุตสาหกรรมเหมืองหิน อุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน รวมถึงการขนส่งหินออกจากโรงงานโม่หินที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุมครบถ้วนได้มีผลโดยตรงทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในบริเวณรอบ ๆ เหมืองและโรงโม่หิน

เนื่องจากต้นทุนในการบรรทุกขนส่งหินมีสัดส่วนที่สูงมาก จึงส่งผลให้หินที่ส่งถึงแหล่งบริโภคมีราคาแพงจนกระทั่งแพงกว่าราคาหินที่รับซื้อโดยตรง ณ แหล่งผลิตหลายเท่า มีการคำนวณว่าค่าใช้จ่ายในการขนส่งด้วยรถบรรทุกโดยการบรรทุกหินทั้งขาไป และขากลับอยู่ในช่วง 0.85 – 0.95 บาท/ตัน/กม. (กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี , 2539) ดังนั้นจึงทำให้มีความจำเป็นต้องจัดตั้งโรงงานให้ใกล้แหล่งที่มีอุปสงค์และอุปทานมากที่สุด ผลก็คือโรงโม่หินจำนวนมากอยู่ในเขตจังหวัดสระบุรีซึ่งเป็นแหล่งหินขนาดใหญ่ที่ใกล้กรุงเทพฯมากที่สุด โดยเฉพาะบริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี ที่มีโรงโม่จำนวนมากตั้งอยู่ใกล้เคียงกัน ปัญหาฝุ่นละอองในบริเวณนั้นอยู่ในขั้นที่รุนแรงมาก การตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศแวดล้อมโรงงาน โดยสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษบริเวณโรงเรียนหน้าพระลาน ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี ในบางเดือนมีค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (PM_{10}) เกินมาตรฐานทุกวัน เช่นในเดือนมีนาคม (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) ส่วนในเดือนอื่น ๆ จำนวนวันส่วนใหญ่ก็เกินจากมาตรฐานที่กำหนด และค่าเฉลี่ยที่ได้ของฝุ่น PM_{10} ก็มีค่าสูงมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ดังนั้นเราจะควบคุมอย่างไรให้อุตสาหกรรมนี้มีผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ในการศึกษานี้จะศึกษาเฉพาะฝุ่นละอองที่พบเห็นในโรงโม่หิน โดยเน้นการป้องกันการเล็ดลอดฟุ้งกระจายของฝุ่นที่เกิดจากอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการ โม่ บด และย่อยหินออกนอกโรงโม่หิน

ตารางที่ 2.1 คุณภาพอากาศบริเวณโรงเรียนหน้าพระลาน ต.หน้าพระลาน จ.สระบุรี ปี พ.ศ. 2539 (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)

เดือน	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppm)			ก๊าซโอโซน (O_3) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (PM_{10}) เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ($\mu g/m^3$)		
	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน
มกราคม	129.0	22.8	0	70.0	18.0	0	3.0	1.2	0	74.0	25.8	0	677.0	382.0	29
กุมภาพันธ์	86.0	6.9	0	101.0	18.5	0	3.0	1.0	0	70.0	26.9	0	660.1	256.2	21
มีนาคม	157.0	8.8	0	78.0	23.4	0	4.0	0.8	0	85.0	14.0	0	582.8	297.2	31
เมษายน	42.0	5.2	0	82.0	21.8	0	1.6	0.7	0	70.0	12.4	0	506.3	264.4	26
พฤษภาคม	72.0	4.7	0	73.0	19.9	0	16.3	3.7	0	46.2	4.9	0	677.5	365.6	30
มิถุนายน	49.0	6.1	0	68.0	19.2	0	2.1	0.6	0	17.0	3.2	0	702.3	441.8	29
กรกฎาคม	43.0	5.5	0	43.0	16.2	0	1.7	0.4	0	28.0	3.5	0	642.2	329.0	24
สิงหาคม	39.0	5.2	0	49.0	14.1	0	7.9	0.4	0	23.3	3.0	0	623.7	415.2	25
กันยายน	57.0	2.7	0	46.0	12.5	0	8.6	0.6	0	67.0	3.8	0	504.8	237.7	21
ตุลาคม	20.0	2.7	0	35.0	9.2	0	8.4	0.7	0	40.0	9.8	0	351.3	103.6	8
พฤศจิกายน	21.7	2.7	0	79.0	14.8	0	1.4	0.4	0	42.0	15.2	0	629.8	201.5	12
ธันวาคม	39.9	3.0	0	53.0	10.3	0	1.3	0.5	0	55.0	25.4	0	399.9	247.1	16
ค่ามาตรฐาน	300			170			30			100			120		

ตารางที่ 2.2 คุณภาพอากาศบริเวณโรงเรียนหน้าพระลาน ต.หน้าพระลาน จ.สระบุรี เดือนมกราคม - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539 (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)

เดือน	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppm)			ก๊าซโอโซน (O_3) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (PM_{10}) เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ($\mu g/m^3$)		
	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน
มกราคม	106.0	5.5	0	72.0	21.0	0	2.8	0.7	0	56.0	21.6	0	731.3	346.9	28
กุมภาพันธ์	59.0	4.4	0	120.0	25.2	0	1.8	0.5	0	63.0	21.1	0	465.6	229.6	22
ค่ามาตรฐาน	300			170			30			100			120		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.1 กระบวนการผลิต

อุตสาหกรรมโม่หินโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการผลิตหินในรูปแบบสายการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2540) กระบวนการผลิตภายในโรงโม่หินเริ่มจากการนำหินออกมาจากเหมืองหินโดยการเจาะและระเบิด หลังจากการระเบิดเกิดขึ้นจะเกิดฝุ่นเล็ดลอดฟุ้งกระจาย (Fugitive Dust) หินจะแตกออกและตกลงจากหน้าผาสูงลงสู่พื้นเหมือง และจะถูกรถตัก (Front – End Loader) ตักหินใส่รถบรรทุก ปริมาณฝุ่นที่ฟุ้งกระจายจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสัดส่วนของซิลท์ (Silt Content คือ สัดส่วนของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร) ในหินและความสูงชันของหน้าผาที่ตกลงมา หลังจากนั้นหินจะถูกบรรทุกมายังโรงโม่หินซึ่งช่วงนี้ก็จะเกิดฝุ่นฟุ้งกระจายจากหินที่บรรทุกในท้ายรถบรรทุก และจากล้อรถที่บดและสัมผัสกับหิน ดิน และฝุ่นที่ตกเรี่ยราดอยู่บนพื้นถนน โรงโม่หินควรจะอยู่ใกล้เหมืองหินเพื่อประหยัดค่าขนส่ง และเพื่อเกิดฝุ่นจากการขนส่งน้อยที่สุด

หินซึ่งผ่านการระเบิดจะถูกลำเลียงจากหน้าเหมืองเพื่อนำมาย่อยในโรงโม่หิน ซึ่งปกติมักจะถูกลำเลียงมาโดยรถเทท้าย (Dump Truck) เพื่อป้อนเข้ายุ้งรับหิน จากนั้นหินก็จะถูกส่งผ่านไปย่อยด้วยเครื่องโม่ขั้นต้น หรือปากโม่ (Primary Crusher) ซึ่งมักจะเป็นเครื่องโม่ซนิดจอว์ (Jaw Crusher) เครื่องป้อนหิน (Feeder) จะถูกใช้ในการป้อนหินจากยุ้งเข้าสู่เครื่องโม่ขั้นต้น โดยทั่วไปมักนิยมใช้เครื่องป้อนแบบ Plate Feeder หรือ Vibrating Grizzly Feeder (ภิญโญ มีชำนะ, 2539)

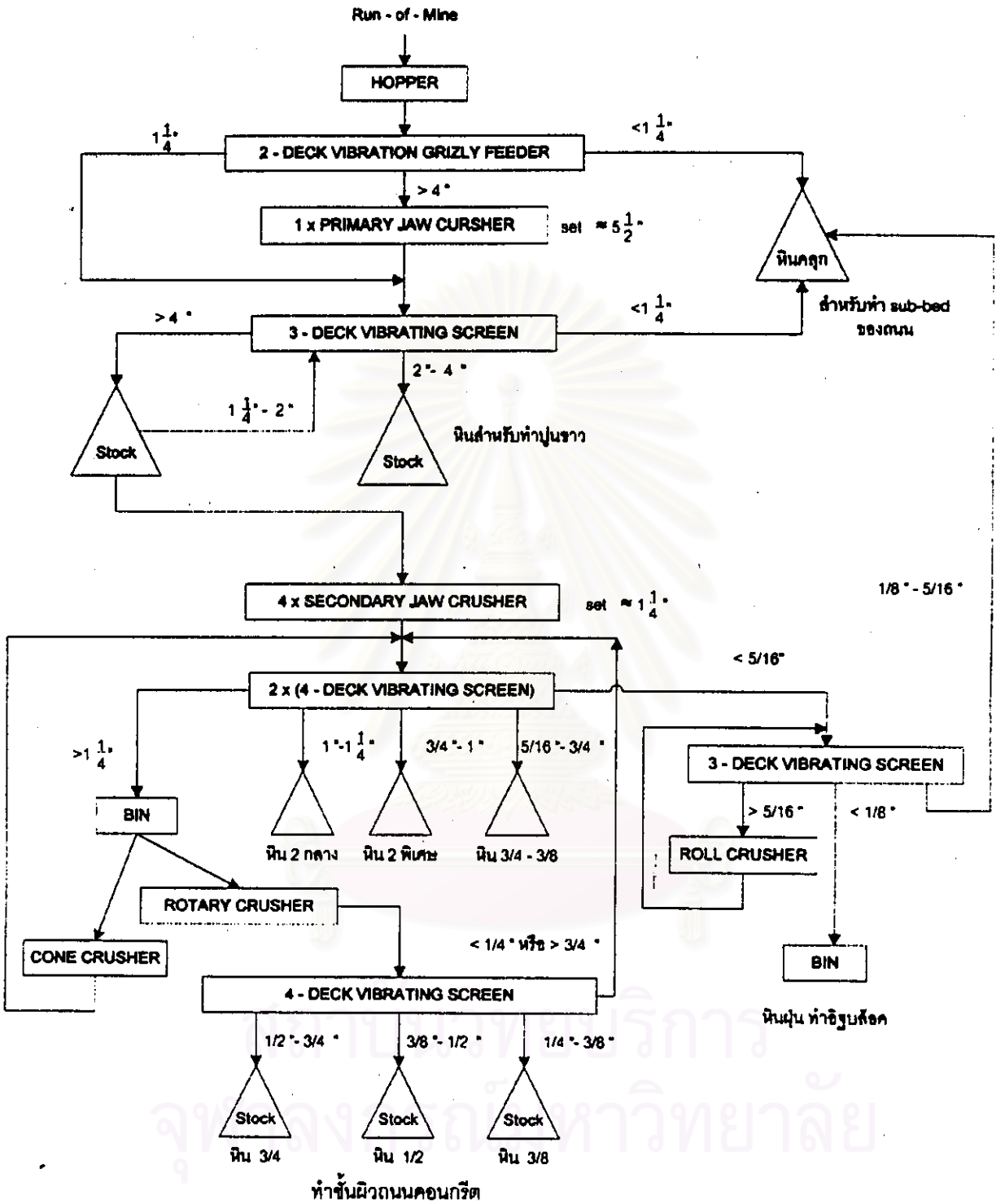
- เครื่องป้อนแบบ Grizzly จะเป็นเครื่องป้อนที่มีกลไกทำให้มีการสั่น ประกอบด้วยแท่งเหล็กขนานกัน โดยมีช่องว่างให้หินขนาดเล็กลอดผ่านออกไป โดยไม่ต้องผ่านเครื่องโม่ขั้นต้น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณหินที่จะผ่านเครื่องโม่ และเพื่อลดความเสี่ยงที่หินขนาดเล็กจะเข้าตามช่องว่างทำให้เกิดการอัดแน่น (Packing) และเครื่องโม่เกิดความเสียหายได้
- เครื่องป้อนแบบแผ่น (Plate Feeder) เครื่องป้อนแบบนี้จะติดตั้งอยู่ข้างใต้ยุ้งปากโม่ การปรับอัตราการป้อนหินสามารถควบคุมได้โดยมีการเคลื่อนไหวชักไป–มา (ปรับความเร็วและช่วงชักได้) มักขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เหมาะสำหรับใช้ป้อนหินที่ไม่แข็งมากนัก เช่น หินปูน

- เครื่องป้อนแบบโซ่ (Chain Feeder) ประกอบด้วยชุดของโซ่ขนาดใหญ่ต่อเป็นวงพันอยู่รอบๆรอก และพาดวางอยู่บนหินที่จะป้อน ตัวหินเองจะอยู่บนยุ้งที่มีความเอียง เมื่อรอกหมุน โซ่ก็จะเคลื่อนที่ หินก็จะเคลื่อนไหลไปตามโซ่ การควบคุมอัตราไหลสามารถทำได้โดยการควบคุมการหมุนของรอกที่โซ่พันอยู่

เมื่อหินป้อนเข้าสู่ปากโม่ หินก็จะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงและถูกควบคุมขนาดด้วยปากทางออก หินที่มีขนาดเล็กลงจะถูกลำเลียงด้วยสายพานลำเลียงไปคัดขนาดด้วยตะแกรงสั่น (Vibrating Screen) ซึ่งจะทำหน้าที่คัดหินออกให้มีขนาดต่างๆ กัน ดินและหินที่ลอดผ่านตะแกรงสั่นขั้นต้นก็จะมารวมปนกันกลายเป็นกองหินคลุก ส่วนหินอื่นๆ จะถูกลำเลียงไปยังกระบวนการต่อไป

อย่างไรก็ตามหินที่ผ่านการย่อยขั้นต้นจะยังคงมีขนาดโตเกินกว่าที่จะนำมาใช้เป็นหินก่อสร้างได้ หินขนาดโตเหล่านี้จะถูกย่อยซ้ำให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องโม่ขั้นที่สอง (Secondary Jaw Crusher) ซึ่งมักจะเป็นเครื่องโม่ทรงกรวย (Cone Crusher) หรือจอว์ (Jaw Crusher) ที่มีขนาดปากเล็กและรูปร่างค่อนข้างแบนซึ่งมักเรียกว่า ปากชอย หลังจากผ่านการย่อยซ้ำแล้วหินจะถูกนำมาคัดขนาดด้วยตะแกรงสั่นอีกชุดหนึ่ง เพื่อทำหน้าที่คัดขนาดหินที่ผ่านการย่อยมาแล้วให้ได้ขนาดต่างๆ ก่อนนำไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง อย่างไรก็ตามอาจมีหินขนาดโตเกินกว่าที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้าง หินเหล่านี้จะถูกตะแกรงสั่นคัดออกมา และมักถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องโม่ขั้นที่สาม (Tertiary Crusher) ซึ่งมักใช้ชนิด Impact Mill หรือ Hammer Mill หรือ Rotary Crusher หินที่ถูกย่อยด้วยเครื่องโม่ขั้นที่สามมักจะถูกนำมาคัดขนาดด้วยตะแกรงสั่นชุดเดิมอีกครั้งหนึ่ง

หินที่ผ่านตะแกรงสั่นขั้นที่สองจะถูกลำเลียงโดยสายพานและตกลงสู่กองหินซึ่งแยกกองตามขนาดหินต่างๆ และจะถูกรถตักตักใส่รถบรรทุกเพื่อลำเลียงออกขายต่อไป สำหรับหินขนาดเล็ก เช่น หินฝุ่นซึ่งก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายมากจะต้องจัดเก็บในยุ้ง และให้รถบรรทุกมารับหินจากก้นยุ้ง



รูปที่ 2.1 แผนภูมิการผลิตของโรงโม่หินทั่วไป

เครื่องจักรที่สำคัญภายในโรงโม่หินแสดงในรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ภิญโญ มีชำนะ , 2540)

2.3.1.1 **เครื่องโม่ขั้นต้น** (Primary Crusher)

เครื่องโม่ขั้นต้นที่นิยมใช้ในประเทศไทย คือ เครื่องโม่จอว์ ลักษณะสำคัญคือ ประกอบด้วยแผ่นย่อย 2 แผ่น แผ่นหนึ่งอยู่กับที่ (Fixed Jaw) แต่อีกแผ่นหนึ่งเคลื่อนที่เข้าและออกจากแผ่นแรก (Swing Jaw) โดยทำงานคล้ายๆกับขากรรไกรเคี้ยวอาหาร แผ่นย่อยทั้งสองจะทำมุมแหลม (Acute Angle) ซึ่งกันและกัน เมื่อนำหินที่ต้องการย่อยมาผ่าน แผ่นทั้งสองก็จะถูกกดหรือหนีบ แล้วปล่อยออกมา หินก็จะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงแล้วเคลื่อนที่ลงไปข้างล่างด้วยแรงโน้มถ่วง แล้วก็จะถูกกดซ้ำอีกจนกระทั่งเคลื่อนที่ออกจากปากทางออก หินที่ถูกย่อยโดยเครื่องโม่ขั้นต้นจะถูกย่อยให้มีขนาดประมาณ 7.5 – 30 เซนติเมตร

2.3.1.2 **เครื่องโม่ขั้นที่สอง** (Secondary Crusher)

เครื่องโม่ขั้นที่สองนี้มักมีน้ำหนักเบา และทำงานเบากว่าเครื่องโม่ข้างต้นเนื่องจากมักทำการย่อยหินที่มาจากเครื่องโม่ขั้นต้น หินที่ป้อนเข้ามามักมีขนาดเล็กกว่า 15 เซนติเมตร นอกจากนั้นแล้วระบบการลำเลียงขนส่ง ตลอดจนระบบป้อนหินเข้าย่อยก็ไม่จำเป็นต้องเป็นระบบที่แข็งแรงมากเท่ากับที่ใช้ในการย่อยขั้นต้น เครื่องโม่ที่นิยมใช้มากได้แก่ เครื่องโม่จอว์ (Secondary Jaw Crusher) เครื่องโม่ทรงกรวย (Cone Crusher) และ เครื่องโม่แบบลูกกลิ้งหรือท่อนกลม (Roll Crusher)

2.3.1.3 **เครื่องโม่ขั้นที่สาม** (Tertiary Crusher)

เครื่องโม่ขั้นที่สามที่นิยมใช้ในโรงโม่หิน คือ เครื่องโม่แบบแรงกระแทก (Impact Crusher) ซึ่งอาจเรียกทั่วๆไปว่าเครื่องโม่โรตารี (Rotary Crusher)

เครื่องโม่แบบแรงกระแทกจะใช้หลักการของแรงกระแทก (Impact) ในการทำให้เกิดการแตกหัก แรงกระแทกจะมาจากวัสดุแข็งมากระแทกหินที่ปล่อยให้หล่นลงมา (Free Falling Rock) โดยมีความเร็วสูง วัสดุแข็งหรือตัวตี (Beater) จะส่งผ่านพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ไปยังวัตถุที่ต้องการย่อยโดยการกระทบ ความเครียดภายใน (Internal Stress) ของวัตถุจะมากพอที่จะทำให้วัตถุเกิดการแตกกระจาย แรงกระแทกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อวัตถุไปกระทบแผ่นแข็ง (Breaker Plate) อีกข้างหนึ่ง

2.3.1.4 เครื่องคัดขนาด (Sizing Screen)

เครื่องคัดขนาดที่นิยมใช้ในโรงโม่ ได้แก่ ตะแกรงสั่น (Vibrating Screen) สามารถคัดหินได้ใหญ่ที่สุด 25 เซนติเมตร และเล็กลงไปถึง 250 ไมโครเมตร การสั่นจะอยู่ในแนวนอนโดยการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวไป – มา (Reciprocating Device) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า แรงสั่นจะส่งผ่านไปยังโครง (Casing) ของตะแกรง หรือบางแบบอาจใช้การสั่นที่มาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยตรง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของหินลอดผ่านตะแกรงในชั้นที่มีขนาดของรูต่างๆกัน ตะแกรงสั่นสามารถทำงานที่ความชัน (Slope) ต่ำโดยใช้ที่ว่างเหนือตะแกรง (Head Room) น้อย ตะแกรงสั่นหลายชั้น (Multi-Deck Vibrating Screen) ทำหน้าที่คัดขนาดโดยตะแกรงรูใหญ่จะอยู่ข้างบน ส่วนตะแกรงถัดมาจะมีขนาดรูเล็กลงตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคัดหินออกมาได้หลายขนาด

2.4 แหล่งกำเนิดฝุ่นในโรงโม่หิน

โรงโม่หินเป็นแหล่งที่ปล่อยฝุ่นออกมาเป็นจำนวนมาก สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ฝุ่นจากโรงโม่หินอาจจำแนกได้เป็น (U.S. EPA, 1992)

- ฝุ่นจากแหล่งกระบวนการ (Process Source) คือ ฝุ่นที่สามารถดักจับและควบคุมได้โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม
- ฝุ่นเล็ดลอด (Fugitive Dust) คือ ฝุ่นบนพื้นหรือที่เกาะติดอยู่ตามเครื่องจักร ซึ่งถูกทำให้ฟุ้งกระจายในอากาศ โดยลม การเคลื่อนไหว หรือการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

2.4.1 ชนิดของแหล่งกำเนิดฝุ่น

การทำเหมืองหินก่อให้เกิดการปล่อยฝุ่นละอองออกมาเป็นจำนวนมาก กิจกรรมหลักในเหมืองหินคือการทำให้หินแตกออกจากกัน โดยการเจาะและการระเบิด ฝุ่นเล็ดลอดจะถูกปล่อยออกมาจำนวนมากเมื่อมีการระเบิด และเมื่อผนังของหน้าผาหินแยกตัวออกและถล่มลงมาที่พื้นเหมือง หินที่แตกแยกออกมาแล้วจะถูกลำเลียงใส่รถบรรทุกโดยรถตัก ปริมาณฝุ่นเล็ดลอดที่ปล่อยฟุ้งออกมาจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของซิลท์ และระยะความสูงของหินตักเทใส่รถบรรทุก

หลังจากนั้นรถบรรทุกก็จะลำเลียงหินไปยังโรงโม่ ระหว่างการขนส่งฝุ่นจากหินในรถบรรทุกอาจตกลงยังพื้นถนนได้

บริเวณหรือกระบวนการที่ก่อให้เกิดฝุ่นในกระบวนการผลิตหิน รวมถึงกิจกรรมต่างๆ ตั้งแต่การนำหินก้อนใหญ่จากเหมืองหิน สู่กระบวนการโม่หิน จนกระทั่งส่งหินที่ย่อยแล้วออกไปจำหน่ายซึ่งจะก่อให้เกิดฝุ่นละอองได้ในทุกขั้นตอน (Richard, 1976)

หากพิจารณาแหล่งกำเนิดฝุ่นต่างๆ ในโรงโม่หินแล้วจะเห็นได้ว่า อาจแบ่งแหล่งกำเนิดฝุ่นได้เป็นสองประเภท คือ แหล่งกำเนิดหลัก และแหล่งกำเนิดรอง ดังนี้ (ภิญโญ มีชำนะ, 2542)

- **แหล่งกำเนิดหลัก**

1) การขนส่งบรรทุกหินจากเหมืองเข้าสู่โรงโม่
2) การเทหินลงสู่ฮอบเปอร์หรือยุ้งรับหิน
3) การบดย่อยหินของเครื่องโม่ชนิดต่างๆ
4) จุดที่หินซึ่งย่อยแล้วตกกระทบลงบนสายพานลำเลียงหิน (Transfer Point)
5) การสั่นสะเทือนที่บริเวณตะแกรงสั่นคัดขนาด
6) การเทหินลงบริเวณกองหิน
7) บริเวณที่รถตักทำการตักหินใส่รถบรรทุก หรือเพื่อเปลี่ยนสถานที่ต่างๆที่ใช้กองหิน
8) บริเวณที่มีการลำเลียงขนส่งด้วยรถบรรทุกในเขตโรงโม่หินก่อนออกสู่ถนนใหญ่
9) ลมที่พัดผ่านโรงโม่หิน ทำให้เกิดฝุ่นฟุ้งกระจายในหลายจุด เช่น
   - สายพานที่ไม่มีแผ่นปิดคลุม
   - กองหินต่างๆ
   - ตะแกรง และเครื่องโม่ที่มีช่องเปิด
   - พื้นที่โรงงานหรือถนนที่มีฝุ่นตกอยู่ เป็นต้น

- **แหล่งกำเนิดรอง**

แหล่งกำเนิดรอง คือแหล่งกำเนิดอื่นๆ นอกเหนือจากแหล่งกำเนิดหลัก ได้แก่ เส้นทางลำเลียงที่ลาดยางหรือเทคอนกรีต และบริเวณพื้นที่อื่นๆในโรงโม่หินที่มีฝุ่น

กลไกการเกิดฝุ่นโดยการปล่อยหินให้ตกลงมาในอุปกรณ์โม่หิน หรือกองกับพื้น หรือปล่อยให้หินตกลงมาระหว่างการเคลื่อนย้ายโดยใช้สายพานเพื่อขนถ่ายหินเข้าสู่กระบวนการอื่นต่อไป แบ่งได้เป็น 2 กลไก ดังนี้คือ (Paul Cooper, 1995)

1) ฝุ่นที่เกิดขึ้นโดยตรงจากการเทหรือปล่อยหินให้ตกลงมาเป็นสาย (Stream Line)

2) ฝุ่นที่เกิดจากหินที่เทหรือตกลงไปกระทบกับกองหินที่อยู่ด้านล่าง

หินที่ตกลงมากระทบกับกองหิน ทำให้อากาศที่อยู่ภายในกองหินเกิดการเคลื่อนที่ออกมา อากาศที่เคลื่อนที่ออกมาทำให้เกิดเป็นแรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesive Force) จึงทำให้ฝุ่นฟุ้งกระจาย

แต่ทั้งนี้ ตามมาตรฐาน U.S. EPA 1991 กำหนดให้ตำแหน่งปล่อยฝุ่นที่สำคัญภายในโรงโม่หิน ได้แก่

1) **เครื่องโม่**

ฝุ่นจะเกิดขึ้นและถูกปล่อยออกจากจุดนี้ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะบริเวณช่องป้อนหินเพื่อทำการโม่และทางออกของหินที่โม่แล้ว ความชื้นและชนิดของเครื่องโม่ที่ใช้จะมีผลต่อการปล่อยฝุ่นออกมาอย่างมาก อัตราส่วนการลดขนาดหินของเครื่องจักร การกระจายขนาดของหินที่โม่แล้ว สัดส่วนของอนุภาคละเอียด และพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในอนุภาคละเอียดเหล่านั้นจะมีผลต่อการปล่อยฝุ่นออกมาโดยตรง

เครื่องโม่ที่ใช้การตีหรือการกระแทกจะทำให้เกิดสัดส่วนอนุภาคที่มีขนาดละเอียดในสัดส่วนที่มากกว่าการใช้การบดอัด นอกจากนั้นเครื่องโม่แบบกระแทกยังมีตัวหมุนกระแทกหินที่มีลักษณะคล้ายใบพัด ทำให้เกิดลมภายในที่พัดฝุ่นออกมามาก ด้วยเหตุผลเหล่านี้เครื่องโม่แบบกระแทกที่ไม่มีการควบคุมฝุ่นจะก่อให้เกิดการปล่อยฝุ่นออกมาต่อจำนวนตันวัตถุดิบที่ป้อนเข้ามามากกว่าเครื่องโม่ชนิดอื่นๆ อนึ่งการปล่อยฝุ่นออกมาจากเครื่องโม่ขั้นที่สอง เครื่องโม่ขั้นที่สาม และเครื่องโม่แบบทรงกรวย จะก่อให้เกิดฝุ่นมากกว่าเครื่องโม่จอว์ เพราะจะก่อให้เกิดอนุภาคละเอียดมากกว่า

2) ตะแกรงคัดขนาด

ฝุ่นที่ปล่อยออกมาจากการทำงานของตะแกรงเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนของหินที่แห้ง ระดับของการปล่อยฝุ่นในกรณีที่ไม่มีการควบคุมจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนอนุภาคละเอียดที่อยู่ในหินที่ป้อน อัตราส่วนความชื้นของหิน และประเภทของตะแกรง โดยทั่วไปตะแกรงที่ใช้คัดขนาดหินที่มีขนาดเล็กกว่าจะปล่อยฝุ่นออกมามากกว่าตะแกรงที่ใช้คัดขนาดหินที่ใหญ่กว่า เช่นเดียวกันตะแกรงที่มีการสั่นที่มีแอมพลิจูดหรือความถี่สูงกว่าจะปล่อยฝุ่นออกมามากกว่าตะแกรงสั่นที่มีแอมพลิจูดหรือความถี่ต่ำกว่า

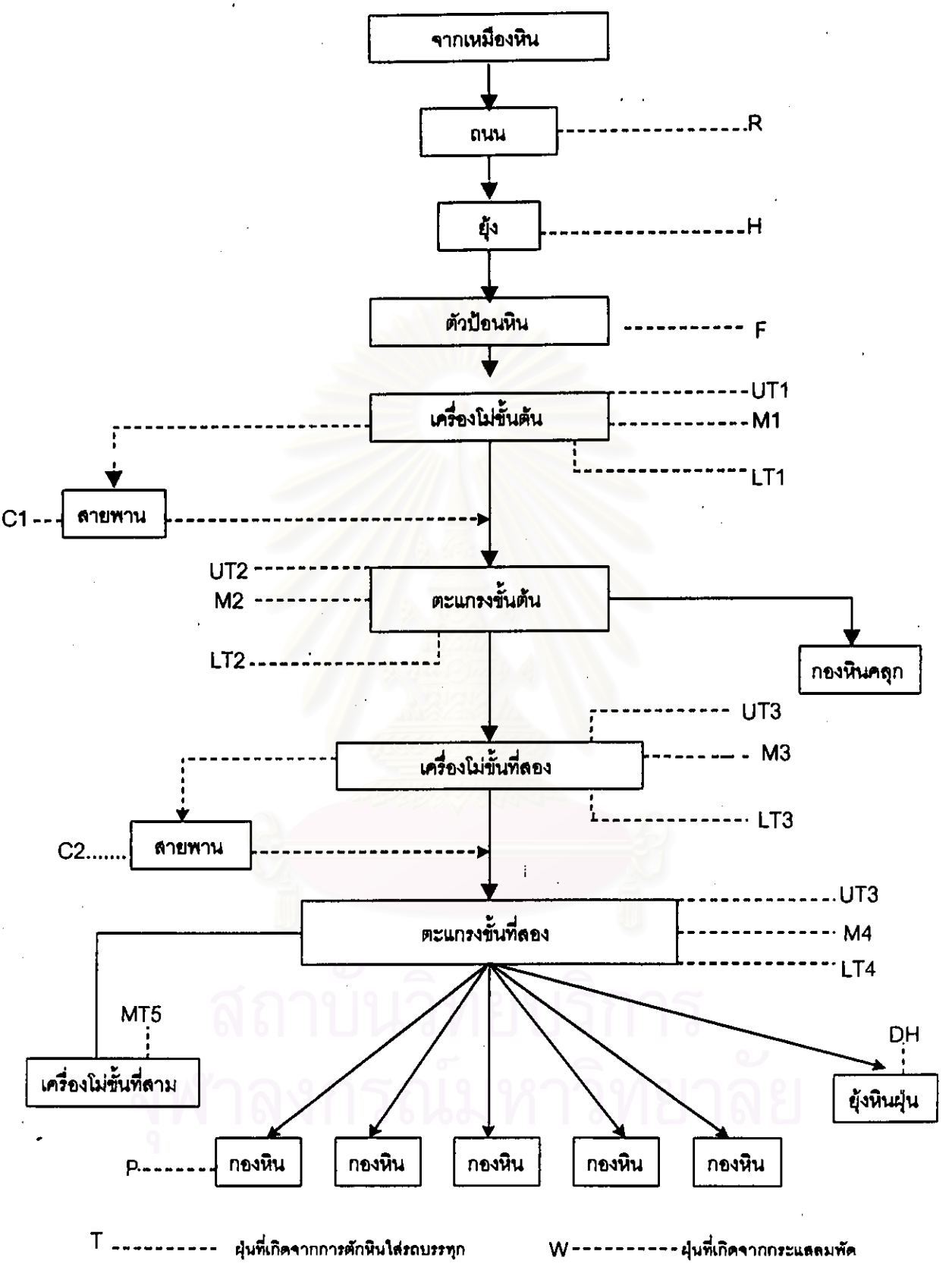
3) จุดถ่ายโอนสายพาน

ฝุ่นที่ปล่อยออกมาจากจุดถ่ายโอนสายพานจะขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดหินบนสายพาน อัตราส่วนความชื้น อัตราเร็วของสายพาน ความเร็วลมจากสิ่งแวดล้อม และระยะการตกอิสระของหินระหว่างสายพาน (Drop Height)

จุดที่เป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นจำนวนมากและลักษณะการเกิดฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการผลิตและกิจกรรมต่างๆ ภายในโรงโม่หินมีแสดงในรูป 2.2 และตารางที่ 2.3 ลักษณะโรงโม่หินที่แสดงในรูปนี้เป็นรูปแบบสายการผลิตที่นิยมใช้ทั่วๆไปในประเทศไทย (กมล ธนะนพวรรณ, 2540)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 จุดกำเนิดและลักษณะการเกิดฝุ่นภายในโรงโม่หิน

ตารางที่ 2.3 จุดกำเนิดฝุ่นสำคัญและลักษณะการเกิดฝุ่นในกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน

ตำแหน่ง	จุด	ลักษณะการเกิดฝุ่น
1. ถนน (road)	R	เกิดจากการวิ่งบนถนนของรถบรรทุกหินทั้งขาเข้าและขาออก โดยฝุ่นเกิดจาก 3 กรณี กรณีแรกเกิดจากฝุ่นฟุ้งกระจายออกจากรถบรรทุก กรณีที่สองเกิดจากล้อรถสัมผัสกับพื้นถนนที่ไม่มีวัสดุคลุม และหรือมีเศษหิน ดิน และฝุ่นตกหรือฟุ้งออกจากรถบรรทุก กรณีที่สามเกิดจากกระแสลมที่พัดให้ฝุ่นหรือหินที่ตกอยู่บนถนนฟุ้งกระจายขึ้นมา
2. ยุ้งเทหิน (hopper)	H	เกิดจากการเทหินออกจากท้ายรถบรรทุกลงยังยุ้ง จะเกิดเป็นช่วงๆ แต่มีจำนวนมากโดยเฉพาะหากไม่มีแผ่นกำบังปกคลุมเหนือยุ้ง แต่จะเกิดเป็นระยะช่วงเวลาไม่นานนักหลังจากการเทหิน
3. ตัวป้อนหิน (feeder)	F	เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวป้อนหินที่ค่อยผลักดันหินหรือสั่นเพื่อให้หินตกลงสู่ปากโม่ใหญ่ ทำให้หินเกิดการเคลื่อนที่ สั่นสะเทือน และเสียดสีกันระหว่างหินกับหิน และระหว่างหินกับเครื่องจักร
4. จุดถ่ายโอนหินด้านบนของเครื่องจักร (upper transfer)	UT	ฝุ่นที่บริเวณด้านบนของเครื่องโม่ จะเกิด 2 กรณี กรณีแรกเกิดจากการที่หินตกกระทบลงบนเครื่องโม่ กรณีที่สองฝุ่นที่เกิดจากการโม่บางส่วนจะฟุ้งกระจายออกทางด้านเหนือปากโม่ เครื่องโม่ขั้นที่สองจะเกิดฝุ่นมากกว่าเครื่องโม่ขั้นต้น เนื่องจากมีฝุ่นขนาดเล็กซึ่งฟุ้งกระจายได้ง่ายเป็นจำนวนมาก และด้านบนของเครื่องโม่ขั้นต้นจะเกิดฝุ่นเป็นจำนวนมากจากการเทหินทั้งหมดลงจากรถบรรทุก หินบางส่วนจะตกลงสู่เครื่องโม่ทันที แต่เกิดฝุ่นเป็นระยะเวลาสั้นๆ ส่วนฝุ่นที่บริเวณด้านบนของตะแกรง เกิดจากการที่หินตกกระทบกับตะแกรงและจากการที่ฝุ่นที่เกิดภายในตะแกรงฟุ้งกระจายออกด้านบน โดยตะแกรงขั้นที่สองจะเกิดฝุ่นจำนวนมากกว่าตะแกรงขั้นที่หนึ่ง
5. จุดถ่ายโอนหินด้านล่างของเครื่องจักร (lower transfer)	LT	เป็นฝุ่นที่เกิดจากสองกรณี คือ กรณีแรกเกิดจากฝุ่นบางส่วนที่ได้จากการโม่ภายในเครื่องโม่หรือเกิดจากการสั่น และคัดขนาดของตะแกรงคัดขนาดฟุ้งออกมาทางช่องทางออกที่อยู่ใต้เครื่องโม่หรือตะแกรง กรณีที่สองเกิดจากหินตกกระทบลงยังสายพานลำเลียงที่คอยรับหินอยู่ด้านล่าง ทำให้เกิดความสั่นสะเทือนและเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นออกมา

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ตำแหน่ง	จุด	ลักษณะการเกิดฝุ่น
6. ระหว่างจุดถ่ายโอนทั้งสอง	M	ในกรณีของเครื่องโม่ หมายถึง ฝุ่นที่เกิดจากการโม่ภายในเครื่องโม่ที่ฟุ้งออกมาตามรอยชำรุด รอยต่อหรือขอบต่างๆ ของตัวเครื่องโม่ ถ้าเครื่องโม่มีสภาพที่สมบูรณ์จะเกิดฝุ่นในกรณีนี้ต่ำหรือต่ำมาก ส่วนตะแกรงคัดขนาดฝุ่นที่เกิดบริเวณด้านหลังหรือด้านข้างของตะแกรงเกิดจากการกระทบกันของหินกับตะแกรงชั้นต่างๆ และความสั่นสะเทือนทำให้เกิดฝุ่นภายในตะแกรงและบางส่วนฟุ้งกระจายออกด้านข้างของตะแกรง บริเวณจุดนี้ตะแกรงชั้นที่สองจะเกิดฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูง และปริมาณมากกว่าตะแกรงชั้นต้นมาก เนื่องจากมีตะแกรงหลายชั้นและฝุ่นตกค้างจำนวนมากจากการโม่ในเครื่องโม่ชั้นที่สอง บางครั้งอาจจะเห็นเป็นกลุ่มหมอกฟุ้งกระจายอย่างต่อเนื่อง
7. สายพาน (conveyor)	C	เฉพาะกรณีที่สายพานลำเลียงไม่ได้วิ่งเป็นเส้นเดียวกัน จะเกิดฝุ่นจากการถ่ายโอนหิน และความสั่นสะเทือน
8. กองหินคลุก และกองหิน (pile)	P	เกิดฝุ่นในสามกรณี คือ กรณีแรกเกิดในช่วงเวลาที่หิน ดิน และฝุ่นตกจากสายพานและแขวนลอยอยู่ในอากาศ ฝุ่นในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของซิลท์ ความเร็วของลม ความชื้น และความสูงที่ลอยอยู่ในอากาศ กรณีที่สองเกิดจากการที่หิน ดิน และฝุ่นตกกระทบกับกองหิน ทำให้เกิดความสั่นสะเทือนและฟุ้งกระจาย กรณีสุดท้าย เกิดจากกระแสลมที่พัดผ่านกองหินทำให้ฝุ่นฟุ้งกระจายขึ้นมา
9. ยุ้งหินฝุ่น (dust hopper)	DH	หินที่โม่จากเครื่องโม่จะตกลงยุ้งปิด จะเกิดฝุ่นในขณะที่เปิดด้านล่างของยุ้งออกเพื่อให้หินฝุ่นตกลงใส่ยังกระบะท้ายของรถบรรทุก ฝุ่นจะฟุ้งกระจายออกมา
10. การตักหินใส่รถบรรทุก	T	หินที่กองไว้จะถูกตักใส่รถบรรทุก จะเกิดฝุ่นฟุ้งกระจายจำนวนมากจากจุดนี้
11. ลม (wind)	W	กระแสลมจะพัดให้ฝุ่นที่ติดค้างอยู่ตามสายการผลิตต่างๆ รวมทั้งพื้นโรงงานภายในโรงโม่ฟุ้งกระจายไปทั่ว ถ้าหากทำความสะอาดเป็นระยะ และมีการจัดการไม่ให้เกิดฝุ่นภายในโรงโม่ ก็จะเกิดฝุ่นตกสะสมจำนวนน้อย ฝุ่นที่เกิดจากกรณีนี้ก็จะน้อยลง

2.4.2 การควบคุมฝุ่น

แนวทางการควบคุมปริมาณฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการโม่ บด และย่อยหิน แบ่งได้เป็น 3 แนวทาง ดังนี้ (กรมทรัพยากรธรณี, 2541)

- ควบคุมไม่ให้เกิดฝุ่นละอองหรือให้เกิดฝุ่นละอองน้อยที่สุด รวมถึงการกำจัดฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นแล้วนั้นไม่ให้ฟุ้งกระจายเล็ดลอดออกจากแหล่งกำเนิด อันได้แก่ การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้เกิดฝุ่นน้อยที่สุด การฉีดพ่นหยดละอองน้ำ หรือการสร้างระบบรวมรวมและส่งผ่านฝุ่นไปยังถุงกรองเพื่อกำจัดฝุ่น
- ควบคุมไม่ให้ฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดเล็ดลอดออกไปสู่ชุมชนหรือภายนอกโรงโม่ เช่น การหาแผ่นวัสดุมาคลุมบริเวณที่เกิดฝุ่น การสร้างอาคารโรงโม่ที่ปิดมิดชิด การล้อมรั้วสูงทึบรอบโรงโม่ และการปลูกต้นไม้รอบโรงงาน และปลูก หญ้า หรือพืชคลุมดิน ในบริเวณที่ว่างรอบๆ โรงโม่หิน เป็นต้น
- ควบคุมเพื่อลดโอกาสที่ฝุ่นละอองจะสัมผัส หรือเข้าสู่ระบบหายใจของคนงาน และ สาธารณชนในบริเวณใกล้เคียง เช่น การสร้างห้องทำงานที่ปิดมิดชิด คนงานไม่ต้องเข้าไปทำงานสัมผัสกับฝุ่น การสวมหน้ากากป้องกัน เป็นต้น

การควบคุม หรือการลดการปล่อยฝุ่นจากกระบวนการผลิตต่างๆ ภายในโรงโม่หินนอกจากจะติดตั้งระบบกำจัดฝุ่นแล้ว จำเป็นต้องมีการจัดการ เปลี่ยนแปลง และดัดแปลงหลายด้านจึงจะสามารถควบคุมฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การควบคุมสำหรับการลดและกำจัดฝุ่นภายในโรงโม่หินควรประกอบด้วย

- การทำให้วัสดุหรือพื้นผิวเปียก (Wetting of Material or Surface) ด้วยน้ำหรือน้ำที่ผสมสารลดแรงตึงผิว หรือสารที่ทำให้เกิดฟอง (Surfactant or Foaming Agent)
- ปกคลุมส่วนที่มีการเคลื่อนที่ของหินที่ยังเปิดอยู่เพื่อป้องกันลม
- ลดความสูงในการตกของวัตถุดิบที่ก่อให้เกิดฝุ่น
- ใช้ระบบดูด ระบบท่อส่ง และระบบรวบรวมฝุ่นในกระบวนการที่ก่อให้เกิดฝุ่น และไม่สามารถใช้วัสดุปกคลุมได้

รายละเอียดแหล่งปล่อยฝุ่นและการควบคุมฝุ่น แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แหล่งปล่อยฝุ่นและการควบคุมฝุ่นของโรงโม่หิน (กมล ธนะนพวรรณ, 2540)

แหล่งปล่อยฝุ่น	การควบคุม
รถบรรทุกหินมายังโรงโม่ (hauling)	การราดถนนด้วยสารลดแรงตึงผิว
	การทำให้ถนนเปียกด้วยน้ำ
	การปรับสภาพดินให้มั่นคง (soil stabilization)
	การราดด้วยวัสดุคลุมผิวหน้าถนน
	การควบคุมจราจร
การโม่	การกำจัดฝุ่นแบบเปียก
	การดูดจับและรวบรวมฝุ่น
ตะแกรง	การกำจัดฝุ่นแบบเปียก
	การดูดจับและรวบรวมฝุ่น
สายพานลำเลียง (จุดถ่ายโอน)	การกำจัดฝุ่นแบบเปียก
	การดูดจับและรวบรวมฝุ่น
กองหิน	บันไดหิน (stone ladder)
	สายพานกองหิน (stacker conveyor)
	จีดหยดละอองน้ำที่จุดปล่อยหินจากสายพาน
ยุ้งเก็บ (storage bin)	การดูดจับและรวบรวมฝุ่น
สายพานจุดอื่นๆ	วัสดุปิดคลุม
	การกำจัดฝุ่นแบบเปียก
ลมพัดกองหิน	การทำให้เปียกด้วยน้ำ หรือสารลดแรงตึงผิว
	การปิดคลุม (ไซโล, ยุ้ง อื่นๆ)
	ตัวกันลม
ลมพัดฝุ่นบนถนนและพื้นที่โรงงาน	การทำให้เปียกด้วยน้ำ
	การใช้น้ำมัน (oiling) หรือสารลดแรงตึงผิว
	การทำให้ดินมั่นคง
	การราดด้วยวัสดุคลุมผิวหน้าถนน
	การกวาดทำความสะอาด
การบรรทุกใส่รถ	การพรมน้ำให้เปียก
	การดูดจับและรวบรวมฝุ่น

นอกจากนี้การควบคุมฝุ่นในโรงโม่หินบางครั้ง จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริม ในการแก้ปัญหา (ภิญโญ มีชำนะ, 2542) อาทิเช่น

1) เครื่องทำความสะอาดสายพาน (Scraper System) เครื่องมือนี้มีลักษณะคล้ายใบมีด ทำด้วยยางหรือแปรง จะติดไว้ใต้สายพานเพื่อขูดเศษหิน ดิน สิ่งสกปรกต่างๆ เครื่องมือนี้มีผู้ผลิตออกจำหน่ายหลายบริษัท เช่น Conflow Ltd. (UK.) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถึง รูปที่ 2.5

2) ระบบครอบสายพาน (Conveyor Sealing System) เป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมฝุ่นที่เกิดขึ้นบริเวณจุดถ่ายโอนระหว่างสายพาน และช่วยป้องกันไม่ให้วัสดุที่กำลังถ่ายโอนร่วงหล่นด้วย ทำได้โดยครอบสายพานด้วยโลหะแผ่นในส่วนบน และส่วนด้านข้างระหว่างสายพานกับโลหะแผ่นนี้จะใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่ดีกว่า เช่น แผ่นยางธรรมชาติ ติดตั้งยึดกับแผ่นโลหะที่ปลายข้างหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งจะแนบติดกับส่วนของสายพาน การออกแบบเน้นที่ความสะดวกในการติดตั้งและซ่อมแซม บริษัทที่จำหน่ายได้แก่ Linemann Ltd. (UK.) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

3) การปิดคลุมเครื่องมือ (Encapsulation System) เช่น ในเครื่องตะแกรงคัดขนาดหิน มีอุปกรณ์เสริมเพื่อยึดติดกับเครื่องมือที่มีอยู่ได้โดยสะดวก เพื่อป้องกันการเล็ดลอดของฝุ่นออกตามช่องว่างต่างๆ ของเครื่องมือ วัสดุที่ใช้เป็นยางมีความหนาประมาณ 0.8 – 1 มิลลิเมตร มีตะเข็บยึดติดกับส่วนขอบของเครื่องมือได้อย่างสะดวก ดังแสดงในรูปที่ 2.7(a) และรูปที่ 2.7(b) บริษัทที่จำหน่ายได้แก่ SVEDALA ส่วนการปิดคลุมระบบสายพานลำเลียง บริษัทที่จำหน่ายได้แก่ Croftsure Engineering ดังแสดงในรูปที่ 2.7(c)

4) รถดูดฝุ่น (Sweeper) มีลักษณะเป็นรถขนาดเล็กที่มีส่วนดูดฝุ่นตอนหน้าของรถคล้ายแปรงขนาดใหญ่ ซึ่งทำหน้าที่ดูดฝุ่นในบริเวณโรงงาน มีความเร็วสูงสุดประมาณ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บริษัทที่จำหน่ายได้แก่ Linde Hydraulics Ltd. (UK.) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

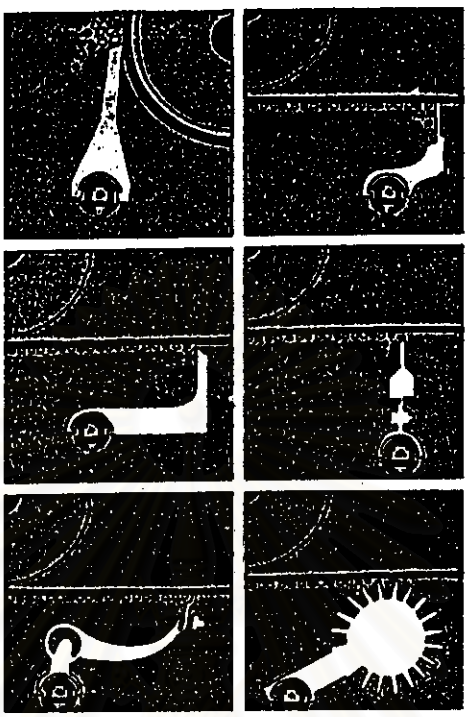
5) เครื่องทำความสะอาดล้อรถ (Wheel Washer) ซึ่งมีลักษณะเป็นราง และมีการพ่นสเปรย์น้ำออกมาจากด้านข้าง เพื่อทำความสะอาดล้อรถ ปริมาณน้ำที่ใช้อยู่ระหว่าง 50-70 แกลลอนต่อคัน และมักจะมีระบบนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling System) ซึ่งทำให้ประหยัดน้ำได้ถึง 90% นอกจากนี้ยังมีเครื่องล้างล้อบางประเภทที่ทำหน้าที่ล้างรถด้วย ด้วยการติดหัวฉีดรอบด้าน บริษัทที่จำหน่ายได้แก่ Moseley Wheel Washer Ltd. (UK.), Enviroflo Ltd. (UK.) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ถึงรูปที่ 2.11

6) ระบบสเปรย์ฉีดน้ำภายในบริเวณโรงงาน (High Pressure Water Systems) เป็นการติดตั้งหัวฉีดสเปรย์น้ำไว้ตามจุดต่างๆ โดยใช้หัวฉีดความดันสูงเพื่อเพิ่มปริมาณความชื้นในอากาศ การฉีดจะทำเป็นเวลาสั้นๆ เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำ บริษัทที่จำหน่ายได้แก่ OPR Ltd. (UK.) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13

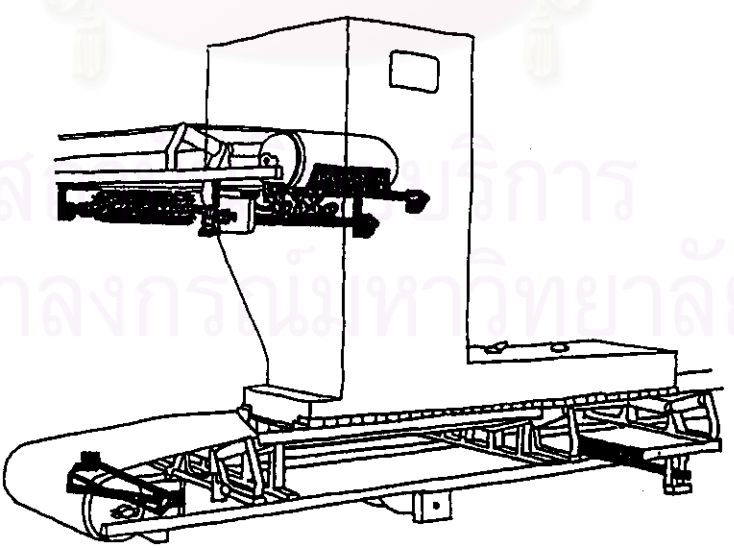
7) การใช้สารเคมีประเภท Wetting Agent เป็นการเติม wetting agent ผสมกับน้ำที่จะใช้สเปรย์ เพื่อควบคุมฝุ่นในขั้นตอนต่างๆ เป็นการลดแรงตึงผิวของน้ำ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจับฝุ่นได้ถึง 30-70% (Michael J. Natale, 1973) บริษัทที่จำหน่ายได้แก่ Conflow Ltd. (UK.), Enviroflo Ltd. (UK.), Midwest Industrial Supply Inc. (UK.) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

8) การใช้ Dust Wetting Additive การเติมสารชนิดนี้กับน้ำที่จะใช้สเปรย์บนถนนจะช่วยลดอัตราการระเหยของน้ำ และช่วยให้น้ำสามารถซึมลงบนผิวถนนได้ดีมากขึ้น ทำให้ลดปริมาณการใช้น้ำได้ถึง 30-50% บริษัทที่จำหน่ายได้แก่ Midwest Industrial Supply Inc. (UK.)

รูปที่ 2.3 Rotary brush system

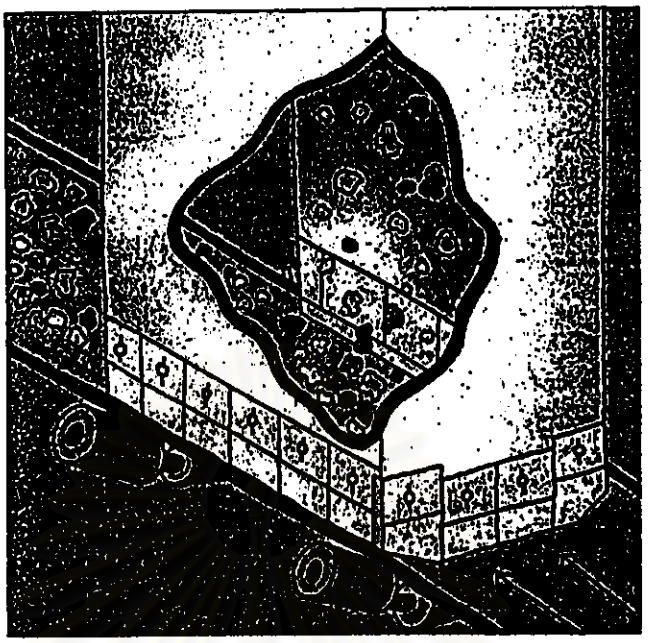


รูปที่ 2.4 เครื่องทำความสะอาดสายพานแบบต่างๆ

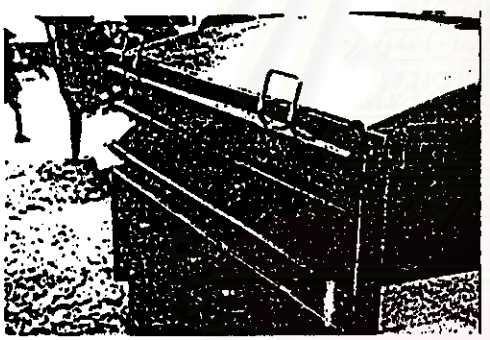


รูปที่ 2.5 ตำแหน่งต่างๆ ของการติดตั้งเครื่องทำความสะอาดสายพาน

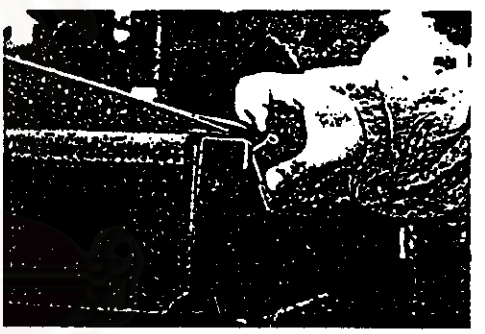
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



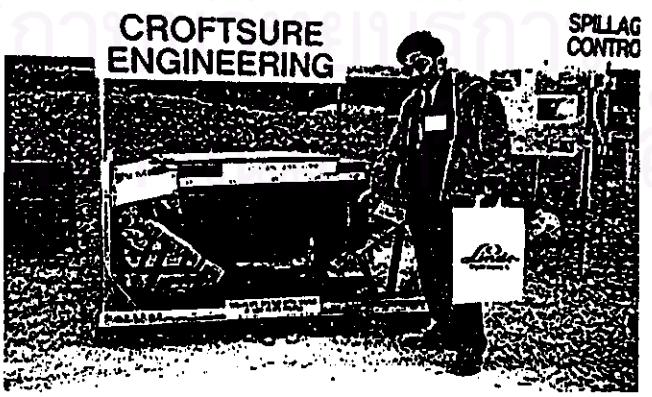
รูปที่ 2.6 ลักษณะการติดตั้ง CAREX เพื่อควบคุมฝุ่นบริเวณ Chute อย่างมิดชิด



(a)



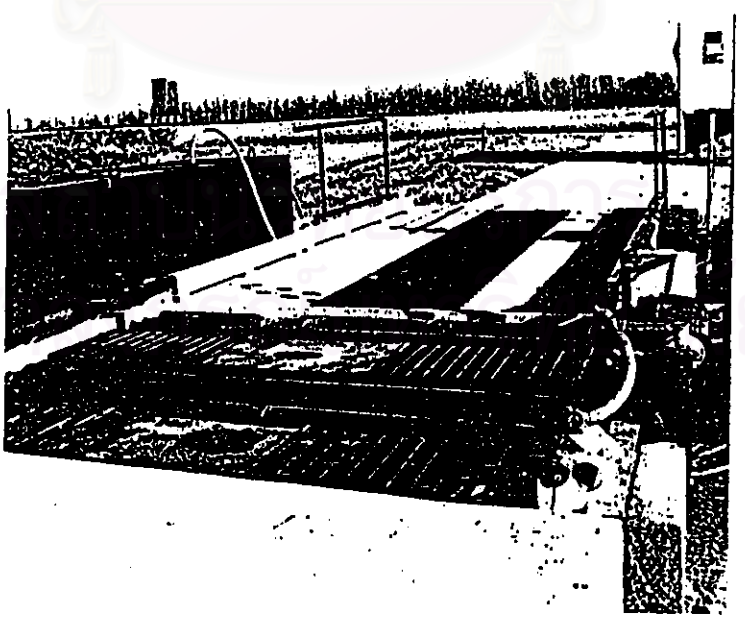
(b)



(c)

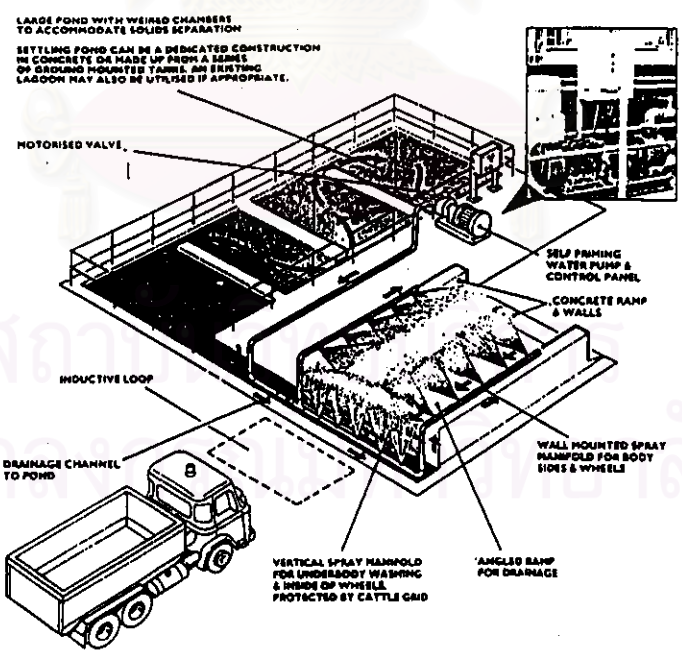
รูปที่ 2.7 Encapsulation system

รูปที่ 2.8 รถดูดฝุ่น Johnston 200 HSC compact sweeper

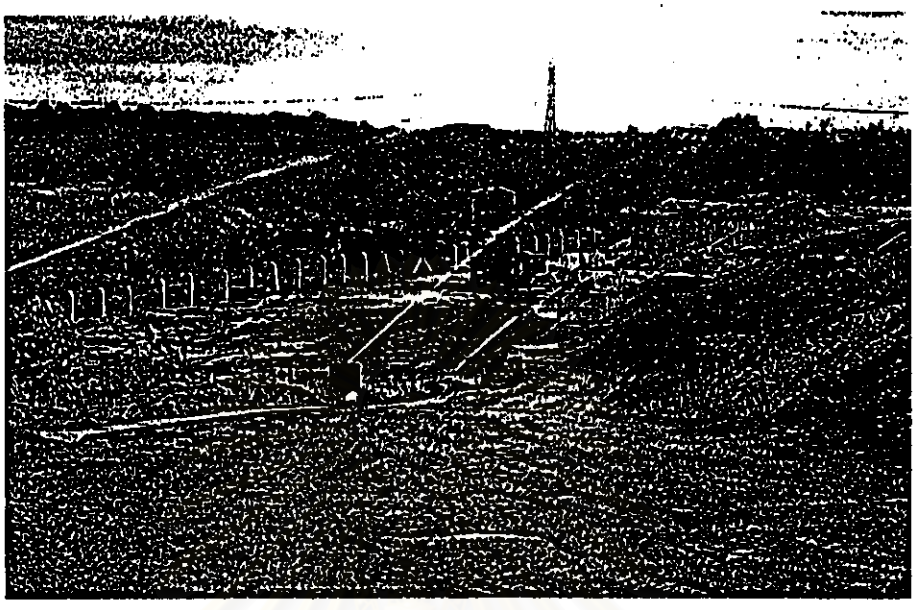


รูปที่ 2.9 Standard wheel washer

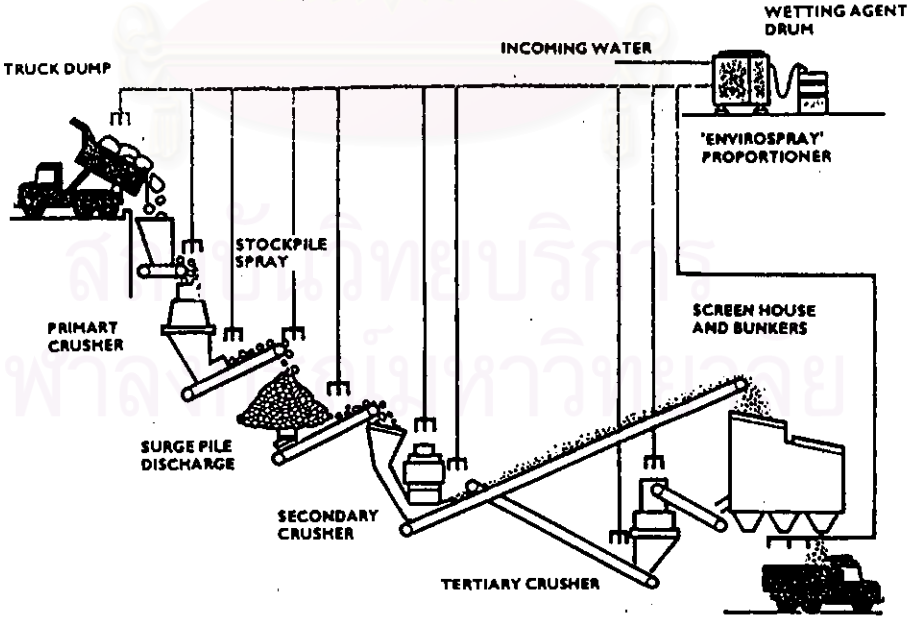
รูปที่ 2.10 Drive through wash



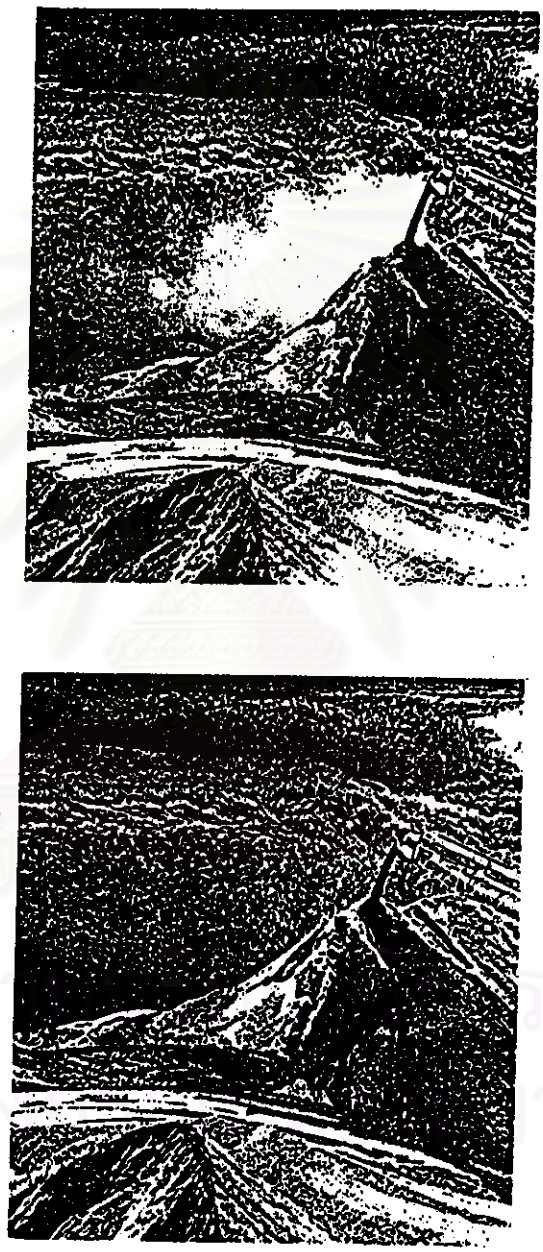
รูปที่ 2.11 การนำน้ำที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ในเครื่องล้างรถ



รูปที่ 2.12 การติดตั้งหัวฉีดสเปรย์ ภายในบริเวณพื้นที่ของโรงโม่หิน



รูปที่ 2.13 ไดอะแกรมแสดงตำแหน่งการติดตั้งหัวฉีดในโรงโม่หิน



รูปที่ 2.14 ภาพรวมของโรงโม่หินก่อนและหลังการทำงานของหัวฉีดน้ำผสม Wetting agent

(Michael J. Natale, 1973)

วิธีที่ประยุกต์ใช้ในการควบคุมฝุ่นจากโรงโม่หินมีหลายวิธี แต่ระบบที่มีการใช้กันอยู่มากและมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ สามารถจำแนกใหญ่ๆ ได้ 2 วิธี

1. ระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก โดยการสเปรย์น้ำ
2. ระบบดูด ท่อส่งฝุ่นและรวบรวมฝุ่น ซึ่งระบบกำจัดฝุ่นในระบบนี้ยังสามารถจำแนกตามระบบรวบรวมฝุ่นออกได้เป็น 2 วิธี
   - ระบบรวบฝุ่นโดยใช้ถุงกรอง
   - ระบบรวบรวมฝุ่นโดยการใช้หอสเปรย์

ระบบควบคุมฝุ่นแต่ละชนิดจะมีข้อดีข้อเสียเมื่อประยุกต์ใช้กับโรงโม่หิน ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)

- ระบบควบคุมฝุ่นโดยการฉีดละอองน้ำ

ข้อดี

1) ระบบมีโครงสร้างที่ง่ายๆ
2) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ
3) สามารถประกอบและติดตั้งได้ง่าย
4) การบำรุงรักษาได้ง่าย

ข้อเสีย

1) ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นแปรเปลี่ยนได้มาก ขึ้นกับปริมาณและขนาดฝุ่นละออง และชนิดของหัวฉีดที่ใช้
2) ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นละเอียดไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นระบบเปิด และได้รับผลกระทบจากกระแสลมจากสิ่งแวดล้อม
3) มีปัญหาการอุดตันของหัวฉีด ถ้าน้ำมีคุณภาพต่ำ
4) อาจก่อให้เกิดการเกาะติดของผงหิน และการอุดตันบางส่วนบนตะแกรงคัดขนาด
5) ละอองน้ำและอากาศที่มีความชื้นสูง อาจนำไปสู่ปัญหาการผุกร่อนของเครื่องจักร และการรั่วของไฟฟ้า และหากใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป อาจทำให้มีน้ำขังบนพื้นบริเวณโดยรอบ
6) ไม่เหมาะกับโรงงานที่ขาดแคลนน้ำหรือมีน้ำบาดาลคุณภาพต่ำมาก

7) การสึกหรอของตะแกรงร่อนอาจรุนแรงขึ้นกว่าในกรณีที่ไม่มีการฉีดน้ำ

- ระบบควบคุมฝุ่นแบบถุงกรอง

ข้อดี

1) ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นสูงกว่า 95-99% แม้ว่าจะเป็นฝุ่นละเอียด
2) ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำช่วย
3) เหมาะกับการกรองฝุ่นจากลมปริมาณที่ค่อนข้างมากซึ่งมีความเข้มข้นของฝุ่นในระดับต่ำถึงปานกลาง

ข้อเสีย

1) มักต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์ดูดและรวบรวมฝุ่น (Hood)
2) ต้องการเงินลงทุนค่อนข้างสูง
3) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบดูดรวบรวมฝุ่นค่อนข้างสูง
4) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่อนข้างสูง
5) ต้องติดตามการทำงานของถุงกรอง โดยสังเกตจากผลต่างความดันคร่อมทั้งสองฝั่งของระบบกรอง เพื่อทราบปัญหาการรั่วเสียหายของถุง
6) ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งพอสมควร

- ระบบควบคุมฝุ่นแบบหอสเปรย์

ข้อดี

1) มีประสิทธิภาพในการจับฝุ่นค่อนข้างสูง แต่ยังต่ำกว่าระบบถุงกรอง
2) เหมาะกับการเก็บฝุ่นจากลมในปริมาณน้อยถึงปานกลาง
3) โครงสร้างง่าย ราคาประหยัด
4) การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยากเหมือนระบบถุงกรอง
5) เงินลงทุนไม่สูง (เมื่อไม่คิดรวมระบบดูดรวบรวมฝุ่น)

ข้อเสีย

1) มักต้องใช้ร่วมกับระบบดูดรวบรวมฝุ่น
2) ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งปานกลาง (น้อยกว่าระบบถุงกรอง)

3) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบดูดรวบรวมฝุ่นค่อนข้างสูง
4) ไม่เหมาะกับโรงงานที่ขาดแคลนน้ำ หรือมีน้ำบาดาลคุณภาพต่ำมาก
5) ลมที่ปล่อยออกมามีความชื้นสูง อาจก่อให้เกิดปัญหาการผุกร่อนของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง

2.5 ระบบจับเก็บฝุ่นโดยใช้ตาข่ายเปียก

ระบบจับเก็บฝุ่นโดยใช้ตาข่ายเปียกเป็นระบบที่มีความประหยัด และมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์สูง ประกอบกับเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงพอสมควร และเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการป้องกันการเล็ดลอดของฝุ่นออกจากโรงโม่หิน

ที่จริงแล้วความคิดในการใช้ม่านตาข่ายเปียกในการจับเก็บอนุภาคฝุ่นไม่ใช่เรื่องใหม่ ได้เคยมีการสำรวจพบโรงโม่หินบางแห่งที่ขึงตาข่ายไนลอนและโรยน้ำให้เปียกชุ่มตลอดเวลา [บางครั้งระบบม่านตาข่ายเปียกนี้มีชื่อเรียกว่า สแลนต์ (Slant)] แต่ก็ประสบปัญหาเรื่องอายุการใช้งานที่สั้น (ตาข่ายฉีกขาดง่าย) ที่สำคัญคือ การออกแบบระบบดังกล่าวอย่างเหมาะสมและถูกต้องตามหลักวิชานั้นยังไม่สามารถทำได้ เพราะขาดข้อมูลการทดลองวิจัยว่าประสิทธิภาพในการจับเก็บฝุ่นของตาข่ายเปียกจะเปลี่ยนตามขนาดอนุภาคฝุ่น, ความเร็วลมที่ไหลผ่านตาข่ายเปียก, ความเข้มข้นของฝุ่นในลม, อัตราการไหลของน้ำที่เปียกชุ่มตาข่าย เป็นต้น อย่างไรบ้าง

ในกรณีที่สร้างม่านตาข่ายเปียกล้อมรอบอาณาบริเวณของกระบวนการโม่หินแทนการปิดทึบแบบ Total Enclosure นอกจากลมภายนอกรอบๆ จะสามารถไหลผ่านเข้าออกแล้ว คาดได้ว่าจะยังมีผลดีดังนี้

1) ฝุ่นละอองส่วนใหญ่ที่ติดมาจากลมภายนอกโรงโม่จะถูกจับออกในขณะที่ลมไหลผ่านตาข่ายเปียกเข้ามา
2) ลมภายนอกที่ผ่านเข้ามาจะเย็นตัวลง โดยการคายความร้อนให้กับการระเหยน้ำบนตาข่ายเปียก ทำให้มีอุณหภูมิลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิกระเปาะเปียก จึงลดปัญหาร้อนอบอ้าวได้ดีกว่าทั้งกรณีเปิดโล่งและกรณีปิดทึบ
3) ฝุ่นละเอียดที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ต่างๆในโรงโม่หินจะถูกตาข่ายเปียกดักจับไว้ ในขณะที่ลมไหลผ่านออกไป จึงลดปัญหาการแพร่เล็ดลอดของฝุ่นออกจากโรงโม่หิน
4) ลมที่ผ่านตาข่ายเปียกออกจากโรงโม่หินมีความชื้นสูงขึ้น ทำให้ฝุ่นที่หลงเหลือผ่านออกมาเกาะตัวกันเป็นก้อนใหญ่ได้ง่ายขึ้น และตกลงบนพื้นอย่างรวดเร็ว

5) น้ำที่เปียกผิวตาข่ายจะช่วยให้สามารถจับฝุ่นขนาดเล็กได้ดีกว่าตาข่ายแห้งที่มีรูเปิดขนาดเดียวกัน จึงสามารถใช้ตาข่ายที่รูเปิดโตขึ้น ลมพัดผ่านสะดวกขึ้น และราคาถูกกว่าตาข่ายรูเปิดละเอียด
6) น้ำจะไหลชะฝุ่นให้ตกลงไปปลายล่างของตาข่าย ทำให้ลดปัญหาการอุดตันของตาข่ายเนื่องจากการสะสมของชั้นฝุ่น
7) น้ำที่ออกจากระบบตาข่ายเปียกสามารถนำกลับมาใช้ในระบบได้ใหม่
8) เหมาะกับพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำไม่อุดมสมบูรณ์
9) ระบบมีโครงสร้างที่ง่ายๆ
10) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ
11) สามารถประกอบและติดตั้งได้ง่าย
12) การบำรุงรักษาทำได้ง่าย

2.6 กลไกของการจับเก็บฝุ่นด้วยตาข่ายเปียก

จากหัวข้อ 2.5 จะพบว่าระบบจับเก็บฝุ่นโดยใช้ตาข่ายเปียก เป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่จำเป็นสำหรับการควบคุม หรือลดปริมาณฝุ่นที่เล็ดลอดออกจากอุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน

ในการศึกษาสมรรถภาพระบบกำจัดฝุ่นดังกล่าวจะต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกของการจับฝุ่นด้วยหยดละอองน้ำ และเส้นใยกรอง กลไกหลักของการเก็บฝุ่นด้วยหยดละอองน้ำ และเส้นใยกรองมีรูปแบบดังนี้ (วิวัฒน์ และคานาโอกะ, 2528)

2.6.1 การกระทบด้วยแรงเฉื่อย (Inertial Impaction)

ในกรณีที่อนุภาคฝุ่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตร หรือใหญ่กว่า การกระทบด้วยแรงเฉื่อยจะมีผลอย่างชัดเจนที่สุดต่อประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นของหยดละอองน้ำที่ใช้ในการจับฝุ่น โดยในรูปที่ 2.15 แสดงหลักการที่ฝุ่นในกระแสก๊าซลากปรกชน และเกาะติดกับหยดของเหลวเนื่องจากแรงเฉื่อย

ตัวเลขไร้มิติที่นิยมใช้แสดงความมากน้อยของแรงเฉื่อย เรียกว่า พารามิเตอร์แรงเฉื่อย (Inertia Parameter) ψ ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\psi = \frac{\rho_p D_p^2 u_R}{18 \mu_a D_w} \qquad (2.1)$$

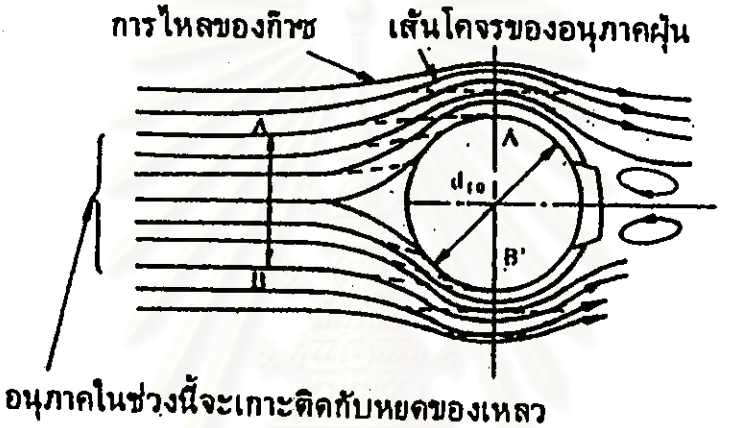
เมื่อ u_R คือ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหยดละอองน้ำกับอนุภาคฝุ่น

D_W คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำ

D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น

μ_a คือ ความหนืดของอากาศ

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่น



รูปที่ 2.15 หลักการที่ฝุ่นในกระแสก๊าซสกปรกชนและเกาะติดกับหยดของเหลว เนื่องจากแรงเฉื่อย

นั่นคือถ้าอนุภาคฝุ่นยิ่งมีขนาดใหญ่ ความหนาแน่นยิ่งสูง และความเร็วสัมพัทธ์เมื่อเทียบกับหยดน้ำยิ่งสูงเท่าใด ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นโดยการกระทบด้วยแรงเฉื่อยจะยิ่งมีค่าสูงขึ้นด้วย

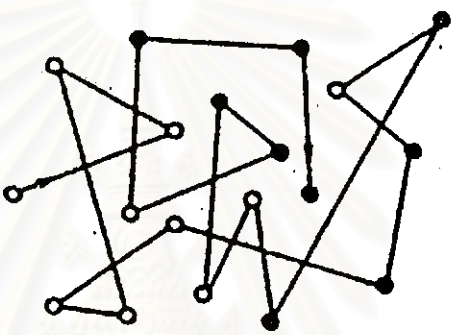
2.6.2 การแพร่ (Brownian Diffusion)

การแพร่เป็นกลไกที่มีบทบาทมากในการจับอนุภาคละเอียดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 ไมโครเมตร หรือเล็กกว่านั้น การเคลื่อนไหวของอนุภาคสกปรกจะเป็นแบบบราวเนียน (Brownian Motion) เพราะถูกชนถี่โดยโมเลกุลของก๊าซที่อยู่รอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.16

ความเร็วที่อนุภาคเกาะติดผิวโดยการแพร่ จะแปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ของอนุภาคนั้น นั่นคือความเร็วของการเกาะติดผิวจะสูงขึ้น เมื่ออนุภาค

มีขนาดเล็กลง(ละเอียดขึ้น) ปริมาณที่อนุภาคเกาะติดผิวจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณฝุ่นในก๊าซ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคฝุ่นกับหยดละอองน้ำและสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค แต่จะแปรผกผันกับความหนืดของก๊าซ

ถ้าอนุภาคฝุ่นมีขนาดเท่ากัน ปริมาณที่อนุภาคฝุ่นเกาะติดหยดของของเหลวโดยกลไกการแพร่จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดละอองน้ำหรือเส้นใย และความเร็วของก๊าซมีค่าน้อยลง



รูปที่ 2.16 อนุภาคที่เคลื่อนไหวแบบบราวเนียน

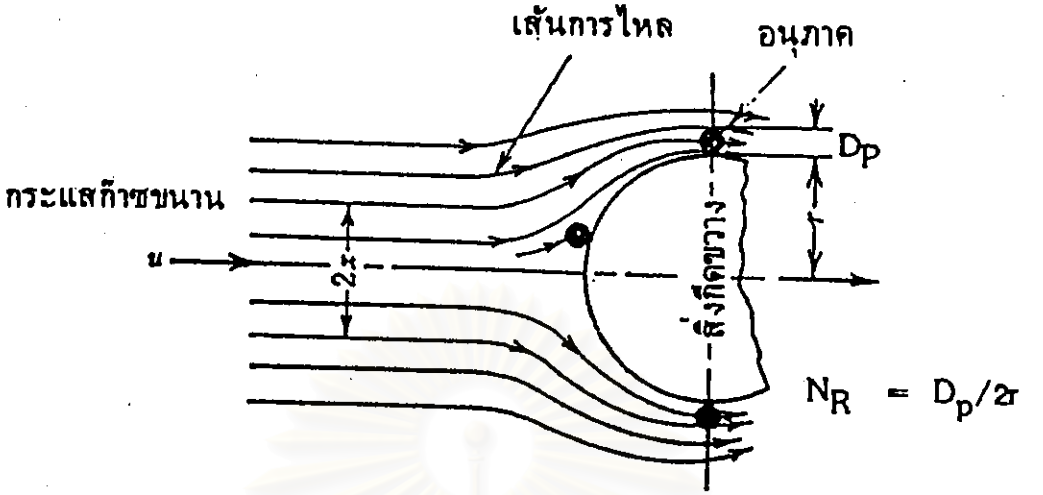
2.6.3 การสกัดกั้น (Interception)

กลไกการสกัดกั้นจะช่วยเสริมประสิทธิภาพในการจับเก็บฝุ่น ไม่ว่าจะโดยกลไกการแพร่หรือกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อย ถ้าอนุภาคฝุ่นมีขนาดไม่เล็กจนเป็นจุดเมื่อเทียบกับสิ่งกีดขวาง (เช่น ม่านน้ำ) ลักษณะที่อนุภาคสัมผัส และเกาะติดกับสิ่งกีดขวางโดยกลไกการสกัดกั้นได้แสดงดังรูปที่ 2.17 และ 2.18

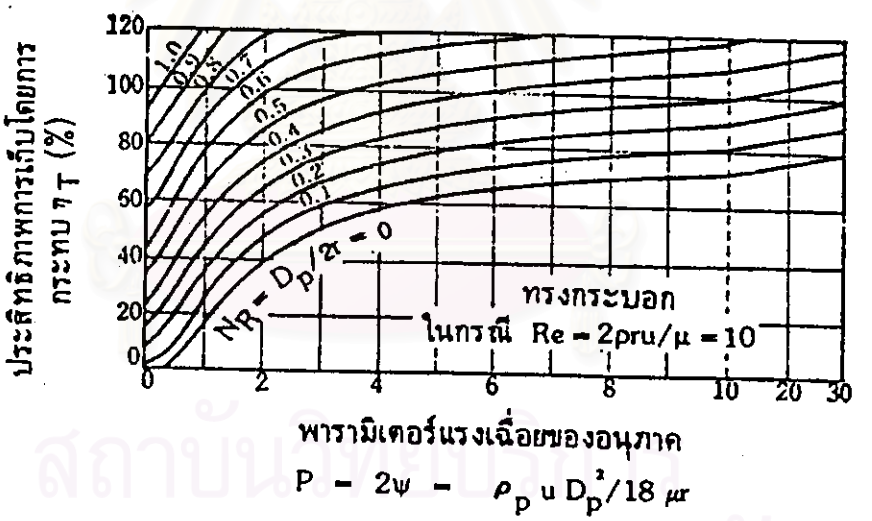
ตัวเลขไร้มิติที่ใช้แสดงผลของการสกัดกั้น มีชื่อเรียกว่า พารามิเตอร์การสกัดกั้น (Interception Parameter, R) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$R = \frac{D_P}{D_W} \qquad (2.2)$$

สรุปว่าประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคจะสูงขึ้นเมื่อ R มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.17 ลักษณะที่อนุภาคสัมผัสและเกาะติดกับสิ่งกีดขวางโดยกลไกการสกัดกั้น



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นโดยการกระทบด้วยแรงเฉื่อย กับค่าพารามิเตอร์แรงเฉื่อยของอนุภาค

สรุปแล้วกลไกการสกัดกั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคโดยการกระทบด้วยแรงเฉื่อย จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพจะสูงขึ้น เมื่อ R มีค่าสูงขึ้น อนึ่งข้อสรุปเดียวกันนี้สามารถใช้กับกรณีของการเก็บอนุภาคโดยการแพร่หรือกลไกอื่นๆด้วย

2.6.4 แรงดึงดูดเชิงไฟฟ้าสถิต (วิวัฒน์ และคานาโอกะ, 2528)

แรงดึงดูดเชิงไฟฟ้าสถิตจะดึงอนุภาคในกระแสก๊าซไปหาเส้นใย ถ้าสองสิ่งนี้มีประจุเครื่องหมายตรงข้ามกัน หรือแม้ว่าเพียงสิ่งหนึ่งสิ่งใดมีประจุไฟฟ้าสถิตก็สามารถก่อให้เกิดประจุเหนียวนำ (Induced Charge) ขึ้นบนอีกสิ่งหนึ่งได้ ทำให้เกิดแรงระหว่างขั้ว (Polarization) ซึ่งยังผลให้เกิดการดึงดูดและเกาะติดของอนุภาคได้ ประจุไฟฟ้ายังมีผลต่อการรวมตัว (Agglomoration) ของอนุภาค ซึ่งเพิ่มความเป็นไปได้ของการดักจับอนุภาค ประจุไฟฟ้าสถิตอาจเกิดจากผลของการเสียดสีระหว่างอนุภาคกับเส้นใย ถึงแม้ว่าจะไม่มีประจุอยู่ในตอนต้นก็ตาม

2.6.5 การเปิดและปิดอย่างฉับพลันของฟิล์มน้ำ (Tetsuo Yoshida, et al. 1975)

เป็นการจับฝุ่นโดยใช้หลักการเปิดและปิดของรูเล็กๆบนม่านฟิล์มน้ำบริเวณช่องถักของตาข่ายอย่างฉับพลัน (Shutter Action) ซึ่งถ้าเวลาในการเปิดและปิดของฟิล์มน้ำสั้นมากพอ ก็จะสามารถจับฝุ่นได้ดี

2.6.6 การประเมินประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นของเส้นใยเดี่ยว (Koichi Iinoya. 1976)

ประสิทธิภาพในการจับเก็บฝุ่นของชั้นกรองสามารถคำนวณได้ โดยการพิจารณาประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นของเส้นใยเดี่ยว

Koichi Iinoya ได้รวบรวมตีพิมพ์สมการในการประเมินหาประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นของเส้นใยเดี่ยวโดยกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อย (η_{OT}) ดังนี้

$$\eta_{OT} = 1 - \frac{1.2}{(Re_f^{0.2} St^{0.54})} + \frac{0.36}{(Re_f^{0.4} St^{1.08})} \qquad (2.3)$$

ในที่นี้

Re_f = ตัวเลขเรย์โนลด์ของเส้นใย ไร้หน่วย = $D_f \rho u_o / \mu$

St = ตัวเลขสโตกส์ ไร้หน่วย = $D_P^2 \rho u_o Cm / 18 \mu D_f$

2.7 มาตรฐานความเข้มข้นฝุ่น

2.7.1 มาตรฐานความเข้มข้นฝุ่นในบรรยากาศ (กมล ธนะนพวรรณ, 2540)

ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2538) และฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2538)

1) ฝุ่นละอองรวม (TSP) ค่าเฉลี่ยในเวลา 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.33 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ยในเวลา 1 ปี ไม่เกิน 0.10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้วิธี Gravimetric ในการวัด
2) ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมโครเมตร (PM_{10}) ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.12 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ยในเวลา 1 ปี ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้วิธี Gravimetric ในการวัด

2.7.2 มาตรฐานความเข้มข้นฝุ่นจากโรงโม่ บด และย่อยหิน

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมเรื่องอากาศ ในการประชุมครั้งที่ 3/2538 มีมติกำหนดมาตรฐานมลพิษทางอากาศจากโม่ บด และย่อยหิน ดังนี้

1) มาตรฐานสารมลพิษทางอากาศจากโรงโม่ บด และย่อยหิน

- มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ

ใช้มาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (2538) โดยมีรายละเอียด คือ

- ฝุ่นละอองรวม (TSP) ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.33 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ย 1 ปี ไม่เกิน 0.10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM_{10}) ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 0.12 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ย 1 ปี ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- จุดตรวจวัดให้ทำการตรวจวัดที่คนอยู่ หรืออาศัยอยู่ วิธีการตรวจวัดแบบ Gravimetric High Volume

- มาตรฐานมลพิษทางอากาศแหล่งกำเนิด

  กรณีโรงโม่ บด และย่อยหิน ไม่มีการติดตั้งระบบดูดฝุ่นละออง

  - มาตรฐานความทึบแสง (Opacity) ที่กระบวนการผลิตของอุปกรณ์โม่ บด และย่อยหิน เช่น เครื่องโม่ย่อยหิน สายพาน ตะแกรงร่อน ฯลฯ ต้องมีความเข้มข้นฝุ่นละอองในหน่วยของความทึบแสง ไม่เกิน 20%
  - จุดตรวจวัด ที่ระยะห่าง 1 เมตร โดยรอบจากขอบแหล่งกำเนิดฝุ่น วิธีการตรวจวัดแบบ Smoke Opacity meter

  กรณีโรงโม่ บด และย่อยหิน มีการติดตั้งระบบดูดฝุ่นละอองระบายอากาศออกทางปล่อง

  - กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ระบายออกไม่เกิน 400 มก./ลบ.ม. และค่าความทึบแสง (Opacity) ไม่เกิน 20%
  - จุดตรวจวัดที่ปล่องระบายอากาศ วิธีตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยวิธี U.S.EPA วิธีที่ 5 Determination of Particulate Emission from Stationary Sources ส่วนความทึบแสงใช้วิธีการตรวจวัดแบบ Smoke Opacity Meter

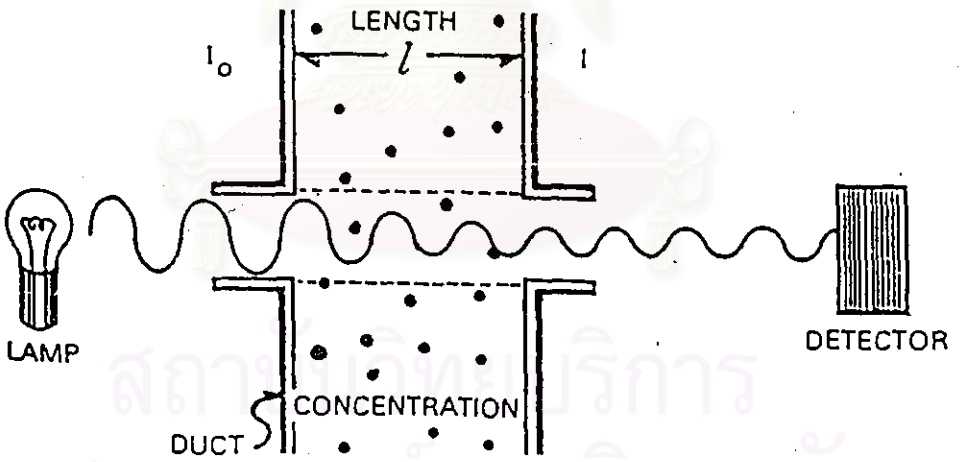
2) กำหนดให้โรงโม่ บด และย่อยหิน ซึ่งจัดเป็นโรงงานประเภทที่ 3 (1) ตาม พรบ.โรงงาน พ.ศ. 2535 ทุกขนาดเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษตามมาตรา 68 พรบ.ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 ที่ต้องถูกควบคุมการระบายมลพิษให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 การใช้ความทึบแสงในการประเมินความเป็นมลพิษของอนุภาคมลสาร

การใช้หลักการของการกระเจิงแสง (Light Scattering) และการดูดซับแสง (Light Absorption) ในการประเมินหาค่าความเข้มข้นของมลสารอนุภาคในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของอนุภาคมลสาร ในปัจจุบันถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในการประเมินต่อเนื่อง (Continuous Monitor Using Opacity Measurement) เพราะสามารถรู้ผลได้ทันทีอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการติดตั้งตามปล่องที่มีการปล่อยมลสารอนุภาคมล เช่น โรงไฟฟ้า โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานหลอมโลหะ เป็นต้น ในการประเมินความเป็นมลพิษจากโรงโม่ บด และย่อยหิน ก็มีการนำมาใช้งานเช่นกัน (Victor H. Sussman, 1977)

การทำงานของเครื่องมือชนิดนี้อาศัยการส่งผ่านของแสงไปยังกระแสของสารอนุภาคหรือฝุ่น แสงจะถูกทำให้เบาบางลงโดยการดูดกลืนหรือกระเจิงเนื่องจากอนุภาค และจะมีตัวรับแสง (Detector) วัดแสงตกกระทบอีกทางด้านหนึ่ง (กมล ธนะนพวรรณ, 2540) ดังแสดงในรูปที่ 2.19



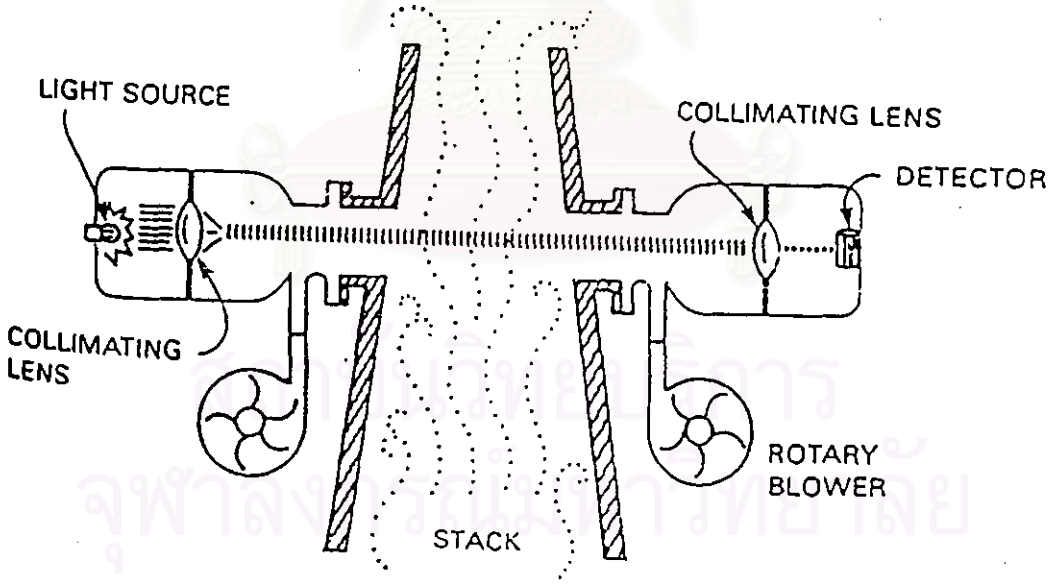
รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของ Opacity Meter

ค่าที่วัดได้เมื่อเทียบกับแสงที่ส่งออกมาจากแหล่งกำเนิด เรียกว่า ค่าการส่งผ่านของแสง (Transmittance Value) และค่าเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงสามารถคำนวณได้จากค่าการส่งผ่านของแสง โดยมีสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความทึบแสง} = 100 - \text{ค่าการส่งผ่านของแสง} \qquad (2.4)$$

ถ้าแสงไม่สามารถส่องผ่านอนุภาคมลสารหรือฝุ่นได้เลยค่าเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงจะเท่ากับ 100% แต่ถ้ากระแสของอนุภาคมลสารไม่ได้ทำให้แสงเบาบางลงเลยค่าเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงจะเท่ากับ 0%

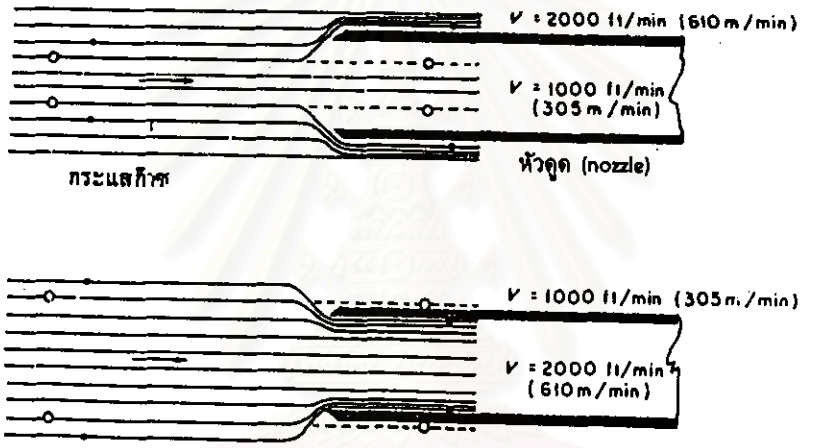
แสงจากแหล่งกำเนิดจะผ่านเลนส์และจะมีตัวทำความสะอาดเลนส์ซึ่งโดยมากจะใช้ชุดของปั๊มลม รูปที่ 2.20 แสดงการประยุกต์ใช้ปั๊มลมกับ Opacity Meter ในการวัดความทึบแสงจากปล่อง



รูปที่ 2.20 การประยุกต์ใช้ Opacity Meter ในการวัดความทึบแสงจากปล่อง

2.9 การเก็บตัวอย่างอนุภาคมลสารแบบไอโซไคเนติก

ถ้าความเร็วที่เก็บตัวอย่างก๊าซ (ความเร็วในหัวดูดตัวอย่าง (Sampling Nozzle)) มีค่าไม่เท่ากับความเร็วของกระแสก๊าซ ณ ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง หรือถ้าทิศทางของหัวดูดตัวอย่างชี้ไม่ตรงกับทิศทางการไหลมาของกระแสก๊าซ ตัวอย่างก๊าซที่ดูดเก็บได้อาจมีความเข้มข้นของอนุภาคมลสารไม่เท่ากับความเข้มข้นที่แท้จริงในก๊าซทิ้ง เหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะอนุภาคขนาดยิ่งโตก็ยิ่งมีความเฉื่อยมากกว่าของโมเลกุลก๊าซรอบๆ ดังนั้นจึงไม่อาจเบี่ยงเบนทิศทางอย่างกระทันหันตามเส้นทางการไหลของก๊าซรอบๆได้ (วิวัฒน์ และ ซิคาโอะ, มลภาวะอากาศ, 2540)



รูปที่ 2.21 การเก็บตัวอย่างที่เลือกเก็บอนุภาค เนื่องจากไม่เป็นแบบไอโซไคเนติก

รูปบนของรูปที่ 2.21 แสดงกรณีที่ความเร็วของก๊าซในหัวดูดตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าความเร็วของก๊าซข้างเคียงในปล่อง เมื่อเป็นเช่นนั้น ส่วนหนึ่งของกระแสก๊าซที่วิ่งเข้าหาหัวดูดด้วยความเร็วที่สูงกว่า จะถูกเบนทิศทางไปรอบๆหัวดูด ผลก็คืออนุภาคขนาดเล็กและน้ำหนักเบา จะหักเลี้ยวตามกระแสก๊าซได้ทันและไม่วิ่งเข้าหัวดูด (Probe) ส่วนอนุภาคที่หนักกว่า ซึ่งมีความเฉื่อยสูงจะหักเลี้ยวไม่ทันและวิ่งเข้าในหัวดูด ดังนั้นอนุภาคที่เก็บได้จะมีความเข้มข้นของอนุภาคหยาบมากกว่าความเป็นจริง ผลก็คือ ความเข้มข้นรวมของอนุภาคมลสารที่วัดได้จะคลาดเคลื่อนไปด้านบวก (มากกว่าความเป็นจริง)

ในทางตรงข้าม รูปด้านล่างของรูปที่ 2.21 แสดงกรณีที่ความเร็วของก๊าซในหัวดูดมีค่าสูงกว่าก๊าซข้างเคียงหัวดูด ในกรณีนี้จะเกิดการกระชับ (Convergence) ของกระแสก๊าซเข้าที่ปลายหัวดูด ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคหยาบในตัวอย่างก๊าซมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้

เนื่องจากอนุภาคหยาบมีความเฉื่อยมาก จึงไม่สามารถหักเลี้ยวตามเส้นทางไหลของก๊าซเข้าสู่หัวดูดได้ทัน ผลก็คือ ความเข้มข้นรวมของอนุภาคมลสารที่วัดได้จะคลาดเคลื่อนไปด้านลบ (น้อยกว่าความเป็นจริง)

วัตสัน (Watson) ได้เสนอสมการต่อไปนี้เพื่อหาค่าความเข้มข้นที่ถูกต้องของอนุภาคมลสาร ในกระแสก๊าซจากความเข้มข้นที่วัดได้จากตัวอย่างที่เก็บ

$$\frac{C}{C_o} = \frac{u_o}{u}\left\{1 + f(St)\left[\left(\frac{u}{u_o}\right)^{0.5} - 1\right]\right\}^2 \qquad (2.5)$$

ในที่นี้

C = ความเข้มข้นที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่าง

C_o = ความเข้มข้นที่แท้จริง

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหัวดูด

D_P = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

St = ตัวเลขสโตกส์ (Stokes number) ไร้หน่วย

= $D_P^2 \rho\, u_o / 18\mu D$

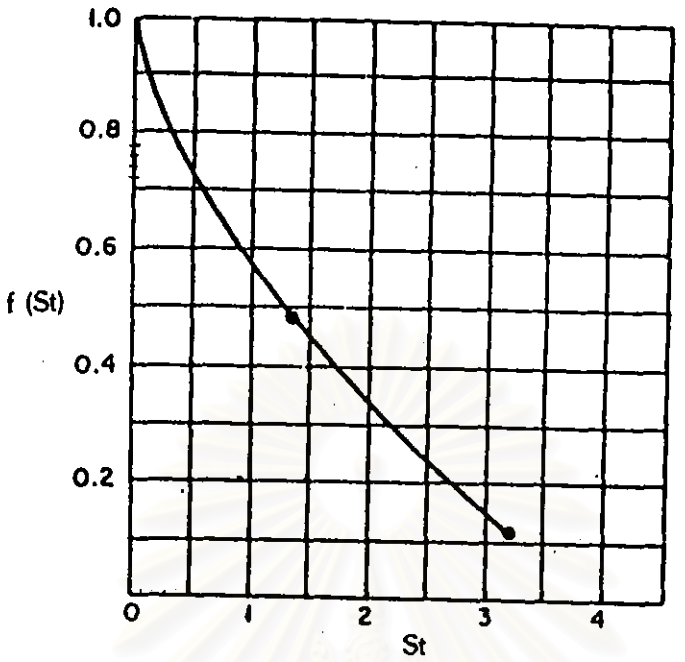
u_o = ความเร็วของกระแสก๊าซ

u = ความเร็วของก๊าซในหัวดูดตัวอย่าง

ρ = ความหนาแน่นของอนุภาค

μ = ความหนืดของก๊าซ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง f(St) และ St

รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน f(St) และ St ซึ่งได้จากการทดลองในอุโมงค์ลม (Wind Tunnel) สิ่งที่น่าสังเกตคือ ค่าของ C_o จะเท่ากับ C เสมอ เมื่อ $u = u_o$ นั่นคือ เมื่อการเก็บตัวอย่างเป็นแบบไอโซไคเนติก ด้วยเหตุนี้ การเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของอนุภาคมลสารจึงควรกระทำให้ใกล้เคียงสภาพไอโซไคเนติกให้มากที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10 การประเมินสมบัติการไหลของฝุ่น

ในการออกแบบอุปกรณ์จำพวกเครื่องป้อน (Feeder), ฮอบเปอร์ หรือ ถังบรรจุ (Bin) ที่ใช้ภายในโรงงาน มักประสบปัญหาเกี่ยวกับการไหลตัวของวัสดุ ดังนั้นจึงมีการตั้งค่ามาตรฐานต่างๆ เพื่อบ่งบอกถึงลักษณะสมบัติของการไหล (Flow Characteristics) ทำให้สามารถจำแนกและแก้ปัญหาการไหลของวัสดุได้ โดยสามารถแบ่งชนิดการไหลของของแข็งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ (จักรกฤษณ์ แย้มเกตุ, 2541)

1. **การไหลอย่างอิสระ** (Free Flow) : เป็นการไหลที่ค่อนข้างคงที่ สม่ำเสมอ สามารถควบคุมได้โดยง่าย อนุภาคที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ ได้แก่ อนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ มีแอกติวิทีของผิว (Surface Activity) ต่ำ รูปร่างไม่ใช่ทรงกลมและการกระจายขนาดไม่สม่ำเสมอ มีความแข็งสูง ไม่มีผลของไฟฟ้าสถิต ไม่เกิดการจับตัวเนื่องจากความชื้นในอากาศ และอนุภาคมีความหนาแน่นสูง

2. **การไหลแบบบ่าทะลัก** (Floodable Flow) : เป็นการไหลที่ไม่นิ่ง ไม่สม่ำเสมอ ค่อนข้างคล้ายกับของเหลวเมื่อเริ่มไหล มีการฟุ้งกระจายและควบคุมการไหลให้สม่ำเสมอได้ยาก อนุภาคที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ ได้แก่ อนุภาคที่มีพื้นที่ผิวค่อนข้างมาก (แต่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคค่อนข้างน้อย) มีสมบัติดูดซับอากาศได้ดี ลักษณะเป็นทรงกลมและมีการกระจายขนาดแบบเท่ากัน ไม่เกาะรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ ไม่เกิดการจับตัวเนื่องจากความชื้นในอากาศ และ มีรูพรุนภายในอนุภาคค่อนข้างมาก

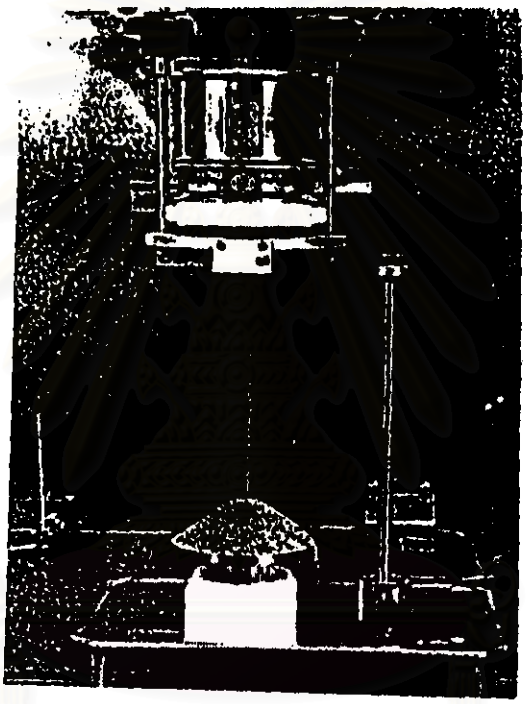
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Carr's Flowability Index

R. L. Carr Jr. (1965) ได้พัฒนาระบบในการประเมินสมบัติการไหลของวัสดุผง โดยการวัดลักษณะสมบัติต่างๆของผงมาตรฐานหลายชนิด แล้วนำมาประเมินเป็นค่าดัชนี ดังนี้

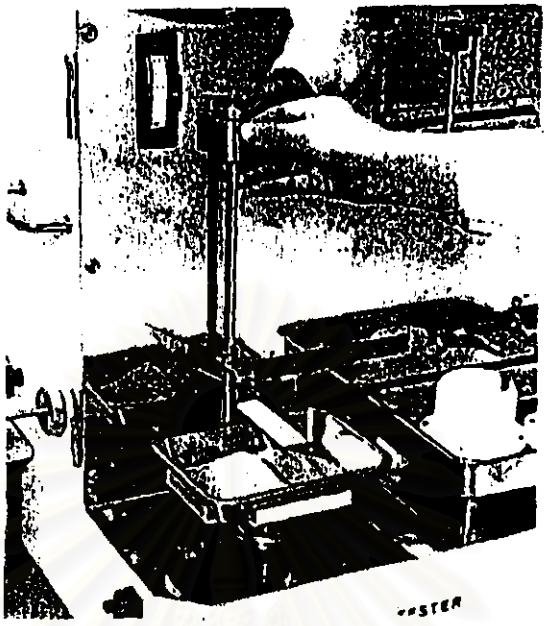
1. **การประเมินค่าดัชนีการไหล** (Flowability Index) : จะประเมินจากสมบัติ 4 อย่างของวัสดุ ได้แก่ ค่ามุมขณะสงบ (Angle of Repose), มุมบนพายตัก (Angle of Spatula), ความอัดตัว (Compressibility) และ ค่าความเกาะกัน (Cohesiveness) หรือ ความสม่ำเสมอ (Uniformity)

1.1) **มุมขณะสงบ (Angle of Repose)** : เป็นมุมที่ผิวด้านข้างของกองอนุภาคของแข็งที่ก่อตัวบนจานรองรับ ทำกับแนวระดับ หลังจากปล่อยอนุภาคให้ตกจากตะแกรงสั่น (Vibrating Screen) ผ่านกรวยแก้วแล้วตกอย่างอิสระลงบนจานรองรับ อนุภาคที่มีค่านี้ยิ่งต่ำ จะแสดงถึงความสามารถในการไหลที่สูงขึ้น (คล่องของเหลวมากขึ้น) และแสดงถึงความสามารถในการฟุ้งที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.23 Measurement of angle of repose

1.2) **มุมบนพายตัก (Angle of Spatula)** : เป็นมุมระหว่างผิวด้านข้างของกองอนุภาคกับแนวระดับ โดยในการวัด จะสอดพายโลหะ (Spatula) ขนาด 5 x 7/8 นิ้ว เข้าไปใต้กองวัสดุแล้วยกขึ้นมาตรงๆในแนวดิ่งอย่างนิ่มนวล แล้วทำการวัดมุมระหว่างแนวระดับกับผิวด้านข้างของกองอนุภาคที่อยู่บนพายโลหะ จากนั้นเคาะพายโลหะเบาๆแล้วทำการวัดมุมอีกครั้งหนึ่ง ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดได้ทั้ง 2 ครั้ง คือ ค่ามุมบนพายตัก (Angle of Spatula) วัสดุโดยทั่วไปจะมีค่ามุมบนพายตักสูงกว่าค่ามุมขณะสงบ ยกเว้นวัสดุที่มีสมบัติการไหลอย่างอิสระสูงๆ วัสดุที่มีค่ามุมบนพายตักสูง จะมีสมบัติการไหลที่ต่ำ สำหรับวัสดุที่มีลักษณะการไหลอย่างอิสระ ค่ามุมบนพายตักจะมีค่าไม่เกิน 40°



รูปที่ 2.24 Measurement of angle of spatula

1.3) **ความอัดตัว** (Compressibility) : สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{ Compressibility} = 100 \times (P - A) / A \qquad (2.6)$$

โดยที่

A = Aerated Bulk Density (ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม) เป็นความหนาแน่นที่ได้จากน้ำหนักของอนุภาคที่ถูกปล่อย ให้ตกลงมาอย่างอิสระภายในถ้วยบรรจุที่มีขนาดตามที่กำหนด (กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร)

P = Packed Bulk Density (ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด) เป็นความหนาแน่นของอนุภาคที่ได้จากการกระแทกถ้วยบรรจุที่มีอนุภาคอยู่ภายในด้วยจำนวนครั้งที่คงที่และความสูงตามที่กำหนด (กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร)

ค่าความอัดตัวที่มากขึ้น บอกถึงความสามารถในการไหลที่ลดลง

1.4) ความเกาะกัน (Cohesiveness) และ ความสม่ำเสมอ (Uniformity) : ปกติแล้วจะเลือกใช้เพียงค่าเดียวในการคำนวณหาค่าดัชนีการไหล โดยค่าความเกาะกัน (Cohesiveness) จะใช้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ส่วนค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) มักใช้กับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ หรือ แกรนูล

- ความเกาะกัน (Cohesiveness) เป็นสิ่งบอกแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่กระทำต่อกันในเชิงกายภาพที่บริเวณผิวของอนุภาค ในการทดลองสามารถหาค่านี้ได้จากอนุภาคที่ค้างอยู่บนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดต่างๆ หลังผ่านการให้ความสั่นสะเทือนด้วยแอมพลิจูดที่กำหนดในช่วงระยะเวลาคงที่หนึ่งๆ ซึ่งเป็นการหาปริมาณของพลังงานที่จำเป็นในการแยกกลุ่มอนุภาคออกจากกัน วัสดุที่มีค่านี้สูง จะมีสมบัติการไหลที่ต่ำ

- ความสม่ำเสมอ (Uniformity) สามารถหาได้จาก

$$\text{ความสม่ำเสมอ} = \frac{\text{ขนาดของอนุภาคที่ 60\% ของมวลอนุภาคที่ลอดผ่านตะแกรงได้}}{\text{ขนาดของอนุภาคที่ 10\% ของมวลอนุภาคที่ลอดผ่านตะแกรงได้}}$$

วัสดุที่มีค่านี้สูง จะมีสมบัติการไหลที่ต่ำ

การหาค่าดัชนีการไหล สามารถประเมินได้จากปัจจัยต่างๆข้างต้นที่วัดได้ โดยนำมาเทียบเป็นค่าดัชนีจากตาราง แล้วนำเอาค่าดัชนีเหล่านี้มารวมกัน (ดูตารางที่ 2.5)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ที่ 2.5 Evaluation of flowability index

Degree of Flowability	Flowability Index	Necessity of Bridge-breaking measure	Angle of Repose		Compressibility		Angle of Spatula		Uniformity		Cohesion	
			Degree	Index	%	Index	Degree	Index	No.	Index	%	Index
Very Good	90 – 100	Not required	≤ 25	25	≤ 5	25	≤ 25	25	1	25		
			26 – 29	24	6 – 9	23	26 – 30	24	2 – 4	23		
			30	22.5	10	22.5	31	22.5	5	22.5		
Fairly Good	80 – 89	Not required	31	22	11	22	32	22	6	22		
			32 – 34	21	12 – 14	21	33 – 37	21	7	21		
			35	20	15	20	38	20	8	20		
Good	70 – 79	Sometimes Vibrator is required	36	19.5	16	19.5	39	19.5	9	19.5		
			37 – 39	18	17 – 19	18	40 – 44	18	10 – 11	18		
			40	17.5	20	17.5	45	17.5	12	17.5		
Normal	60 – 69	Bridging will take place at the Marginal point	41	17	21	17	46	17	13	17		
			42 – 44	16	22 – 24	16	47 – 59	16	14 – 16	16		
			45	15	25	15	60	15	17	15	≤ 6	15
Not Good	40 – 59	Required	46	14.5	26	14.5	61	14.5	18	14.5	6 – 9	14.5
			47 – 54	12	27 – 30	12	62 – 74	12	19 – 21	12	10 – 29	12
			55	10	31	10	75	10	22	10	30	10
Bad	20 – 39	Powerful measure should be provided	56	9.5	32	9.5	76	9.5	23	9.5	31	9.5
			57 – 64	7	33 – 36	7	77 – 89	7	24 – 26	7	32 – 54	7
			65	5	37	5	90	5	27	5	55	5
Very Bad	0 – 19	Special apparatus and techniques are required	66	4.5	38	4.5	91	4.5	28	4.5	56	4.5
			67 – 89	2	39 – 45	2	92 – 99	2	29 – 35	2	57 – 79	2
			90	0	≥ 45	0	≥ 99	0	≥ 35	0	≥ 79	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) การประเมินค่าดัชนีการไหลทะลัก (floodability Index) : ค่านี้บอกถึงแนวโน้มการไหลทะลักที่คล้ายกับของไหล และยังบ่งบอกถึงความสามารถในการฟลูอิไดซ์ในอากาศ โดยสามารถประเมินค่านี้ได้จากลักษณะสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ค่าดัชนีการไหล (Flowability Index), มุมหลังตก (Angle of Fall), มุมผลต่าง (Angle of Difference) และค่าการแผ่กระจาย (Dispersibility)

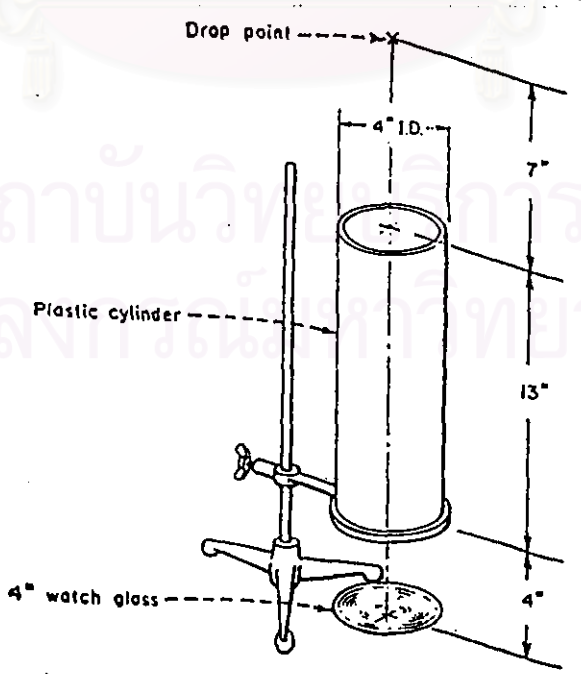
2.1) ค่าดัชนีการไหล (Flowability Index) : หาได้จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยถ้าอนุภาคมีค่าดัชนีการไหลมาก จะทำให้มีค่าดัชนีการไหลทะลักสูงขึ้นตามไปด้วย

2.2) มุมหลังตก (Angle of Fall) : เป็นมุมของผิวด้านข้างของกองอนุภาคของแข็งที่ก่อตัวได้บนจานรองรับ หลังจากได้รับแรงสั่นสะเทือนตามขนาดแรงที่กำหนด อนุภาคที่มีค่านี้ต่ำ จะมีค่าดัชนีการไหลทะลักสูง

2.3) มุมผลต่าง (Angle of Difference) : เป็นผลต่างระหว่างค่ามุมขณะสงบ (Angle of Repose) กับ ค่ามุมหลังตก (Angle of Fall) อนุภาคที่มีค่านี้สูง จะมีค่าดัชนีการไหลทะลักสูง

2.4) ค่าการแผ่กระจาย (Dispersibility) : เป็นการวัดค่าความสามารถของวัสดุที่จะทำการฟลูอิไดซ์ หรือมีสมบัติการไหลแบบบ่าทะลัก (Floodable Flow) โดยสามารถหาได้จากการปล่อยอนุภาคที่มีมวลคงที่จำนวนหนึ่ง จากความสูงที่กำหนดลงบนแผ่นกระจกนาฬิกา (Watch Glass) ผ่านกระบอกแก้ว ดังรูปที่ 2.25

การประเมินค่าดัชนีการไหลทะลัก สามารถหาได้จากตารางเช่นเดียวกัน (ดูตารางที่ 2.6)



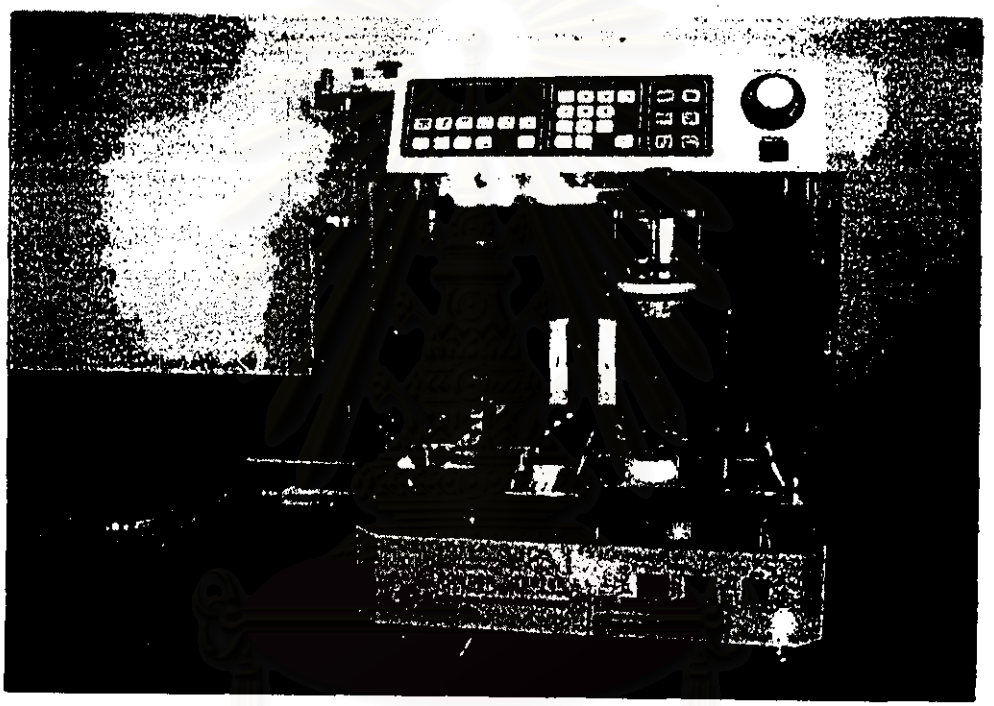
รูปที่ 2.25 Device for measuring dispersibility

ตาราง ที่ 2.6 Evaluation of floodability index

Degree of Floodability	Floodability Index	Measure for Flushing Prevention	Flowability		Angle of fall		Angle of Difference		Dispersibility	
			Index from (Table 2.5)	Index	Degree	Index	Degree	Index	%	Index
Very High	80 – 100	Rotary seal must be used	≥60	25	≤ 10	25	≥ 30	25	≥ 50	25
			59 – 56	24	11 – 19	24	29 – 28	24	49 – 44	24
			55	22.5	20	22.5	27	22.5	43	22.5
			54	22	21	22	26	22	42	22
			53 – 50	21	22 – 24	21	25	21	41 – 36	21
			49	20	25	20	24	20	35	20
Fairly High	60 – 79	Rotary seal is required	48	19.5	26	19.5	23	19.5	34	19.5
			47 – 45	18	27 – 29	18	22 – 20	18	33 – 29	18
			44	17.5	30	17.5	19	17.5	28	17.5
			43	17	31	17	18	17	27	17
			42 – 40	16	32 – 39	16	17 – 16	16	26 – 21	16
			39	15	40	15	15	15	20	15
Tends to flush	40 – 59	Sometimes rotary seal is required	38	14.5	41	14.5	14	14.5	19	14.5
			37 – 34	12	42 – 49	12	13 – 11	12	18 – 11	12
			33	10	50	10	10	10	10	10
May flush	25 – 39	Rotary seal is necessary depending on flow speed and feeding conditions	32	9.5	51	9.5	9	9.5	9	9.5
			31 – 29	8	52 – 56	8	8	8	8	8
			28	6.25	57	6.25	7	6.25	7	6.25
Won't flush	0 – 24	Not required	27	6	58	6	6	6	6	6
			26 – 23	3	59 – 64	3	5 – 1	3	5 – 1	3
			> 23	0	< 64	0	0	0	0	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในรูปที่ 2.26 เป็นรูปของเครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของวัสดุผง (Powder Characteristic Tester) ซึ่งใช้หาค่าดัชนีการไหลและดัชนีการไหลทะลักของอนุภาค ซึ่งสร้างและพัฒนาขึ้นมาตามวิธีการประเมินการไหลตัวของคาร์ร์ โดยสามารถวัดและคำนวณค่าต่างๆที่ใช้ในการประเมินการไหลตัว ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 2.26 Powder characteristic tester

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย