บทที่ 3

ทฤษฎี

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาผลประโยชน์จากข้อมูลที่ซ้ำซ้อนของกระบวนการที่ทำให้เกิดการตรวจสอบโดยละเอียดของการวัดกระบวนการที่เวลาจริง โดยการรวมการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลกับการตรวจจับความผิดพลาดชัดเจน และการประยุกต์ใช้วิธีการที่ได้พัฒนาแล้วในกรณีศึกษากระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก บทบาทหลักของการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลเป็นการทำให้สอดคล้องของข้อมูลกระบวนการที่วัดได้ ให้เป็นไปตามขอบเขตบังคับ และระบบมีประสิทธิภาพที่จะประเมินสถาพปัจจุบันของตัวแปรกระบวนการและตัวแปรที่วัดไม่ได้ของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลให้อยู่ในรูปปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) การตรวจจับความผิดพลาดชัดเจน ประโยชน์จากการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลและการตรวจจับความผิดพลาดชัดเจน ทฤษฎีเกี่ยวกับผงซักฟอก กระบวนการผลิตผงซักฟอก และการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

3.1 การปรับให้สอดคล้องของข้อมูล [6]

กระบวนการวัดถูกทำให้เกิดความเสียหายจากความผิดพลาดในระหว่างการวัดกระบวนการและการส่งผ่านของสัญญาณที่วัดได้ ถ้ามีการใช้ข้อมูลนี้โดยปราศจากวิธีการในการควบคุมกระบวนการ อาจมีผลกระทบต่อความสำเร็จที่น่าพอใจของโรงงาน (เช่น คุณภาพ ผลที่ได้ วันที่กำหนดว่าจะได้ผลผลิต) และสามารถผลักดันให้โรงงานเกิดสถานการณ์ที่ไม่ปลอดภัย ดังนั้นการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล (DR) เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาปรับปรุงให้เกิดความถูกต้องแม่นยำในการวัด โดยลดผลของความผิดพลาดแบบสุ่มในข้อมูล ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลกับวิธีการอื่นคือ การปรับให้สอดคล้องของข้อมูลจะใช้การบังคับจากแบบจำลองกระบวนการ และสามารถประมาณตัวแปรกระบวนการโดยการปรับกระบวนการวัด ดังนั้นการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลจึงเป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการปรับปรุงความถูกต้องแม่นยำในการวัด การประมาณที่ดีที่สุดของคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความเข้มข้นและอุณหภูมิถูกนำมาใช้ในวิธีการควบคุมเพื่อลดระดับของความเสียหายของข้อมูลในกระบวนการ และปรับปรุงผลของกระบวนการ เพื่อนำไปสู่การควบคุมคุณภาพที่ดีขึ้น

การประมาณการที่สอดคล้อง ถูกคาดหวังว่าจะมีความถูกต้องมากกว่าการวัด ในการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ จะไม่มีความผิดพลาดชัดเจนในการวัดหรือในแบบจำลองกระบวนการ การตรวจจับความผิดพลาดชัดเจนเป็นวิธีการหนึ่งของการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแสดงและกำจัดความผิดพลาดชัดเจน ดังนั้นการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลและการตรวจจับความผิดพลาดชัดเจน จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกันเพื่อปรับปรุงความถูกต้องแม่นยำของข้อมูลที่วัดได้

การปรับให้สอดคล้องของข้อมูลและการตรวจจับความผิดพลาดชัดเจน ประสบผลสำเร็จในการลดความผิดพลาด โดยการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของการวัดที่ซ้ำซ้อน โดยทั่วๆ ไป ความผิดพลาดทั้งหมดในการวัด ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้และค่าของตัวแปร มี 2 ประเภทคือ

1. ความผิดพลาดแบบสุ่ม มีอยู่โดยธรรมชาติในกระบวนการวัด ปกติจะมีขนาดเล็กและมักถูกอธิบายโดยใช้การกระจายตัวของความน่าจะเป็น ความผิดพลาดนี้มีสาเหตุมาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน เช่น การส่งผ่านพลังงานไม่สม่ำเสมอ การส่งสัญญาณเครือข่าย การปรับเปลี่ยนสัญญาณคลื่นรบกวน และการเปลี่ยนแปลงสภาพเงื่อนไขโดยรวม

2. ความผิดพลาดชัดเจน เช่น เครื่องมือหรืออุปกรณ์ไม่ทำงานตามปกติ (เนื่องจากการติดตั้งที่ไม่เหมาะสม) การปรับเพื่อแก้ไขทำผิดพลาด การสึกกร่อนของเครื่องส่งสัญญาณ และการตกตะกอนของของแข็ง ธรรมชาติของความผิดพลาดนี้แสดงให้เห็นว่าทุกเวลามีความสำคัญแน่นอน ดังนั้นถ้าการวัดถูกกระทำซ้ำด้วยเครื่องมือที่เหมือนกันภายใต้สภาพเงื่อนไขที่ระบุไว้ ระบบความผิดพลาดที่มีต่อค่าที่วัดได้จะเหมือนกัน ถ้ามีการติดตั้งเครื่องมือและการบำรุงรักษาที่ดีเป็นไปได้ที่จะไม่มีความผิดพลาดชัดเจนในการวัดอย่างน้อยก็ในบางเวลา ความผิดพลาดชัดเจนเกิดจากการปรับสัญญาณเพื่อแก้ไขทำผิดพลาด อาจจะเกิดขึ้นอย่างกระทันหัน และหลังจากนั้นจะยังคงอยู่ในระดับเดิม สาเหตุของความผิดพลาดชัดเจนอย่างอื่น เช่น การเสื่อมสึกกร่อนหรือความสกปรกอุดตันของเครื่องส่งสัญญาณอาจจะค่อยๆ เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง และขนาดของความผิดพลาดชัดเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นความผิดพลาดชัดเจนนี้มักจะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก แต่ความสำคัญของมันจะมากกว่าความผิดพลาดแบบสุ่ม

3.2 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลให้อยู่ในรูปปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization)

การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาของการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลให้อยู่ในรูปปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) นั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัด โดยที่ข้อจำกัดสำหรับปัญหาของการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลนี้คือ

สมการการอนุรักษ์มวลสารและพลังงาน ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลสามารถกำหนดให้อยู่ให้รูปของ Weighted Least-Square (WLS) หรือ Maximum Likelihood Estimation (MLE)

3.2.1 วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Least-Square)

รูปแบบการกำหนดปัญหาการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลให้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักเป็นดังนี้

$$\text{Minimize} \quad : \quad e^T \sum^{-1} e = (y-x)^T \sum^{-1} (y-x) \tag{3.1}$$

$$\text{Subject to} : \quad f(x) = 0 \tag{3.2}$$

โดยที่ $e = y - x$, y คือ ตัวแปรกระบวนการที่ถูกวัด, x คือ ค่าจริงของตัวแปรที่ถูกวัด, $\sum$ คือ เมทริกซ์ความแปรปรวน, $f(x)$ คือ แบบจำลองของกระบวนการ วิธีการนี้จะเป็นการหาค่าจริงของตัวแปรที่ถูกวัดเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าที่วัดได้มีความแตกต่างกันน้อยสุด โดยค่าจริงที่หาได้ต้องเป็นไปตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ

3.2.2 การประมาณความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation)

การประมาณความน่าจะเป็นสูงสุด สามารถนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยจัดให้อยู่ในรูปฟังก์ชันความน่าจะเป็นสูงสุด (maximize likelihood function) ซึ่งใช้หลักการทางสถิติโดยค่าตัวแทนของข้อมูลที่ดีที่สุดนั้น จะต้องเป็นค่าที่ทำให้ผลคูณของค่าความน่าจะเป็นของระบบในแต่ละช่วงเวลามีค่ามากที่สุด มีรูปแบบเป็นดังนี้

$$\max P = \max \prod_i P_i \tag{3.3}$$

โดยที่ P_i คือค่าความน่าจะเป็นของข้อมูลที่ได้จากการวัดในแต่ละช่วงเวลา

โดยทั่วไปแล้วฟังก์ชันความน่าจะเป็นสูงสุดสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของการหาค่าน้อยที่สุด ได้ดังนี้

$$\min \sum_i \rho\left(\frac{y_i - x_i}{\sigma_i}\right) \tag{3.4}$$

โดย ρ คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของความน่าจะเป็น ซึ่ง ρ ที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ Contaminated Normal และ Lorentzian distribution function ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

1. Contaminated normal distribution function

$$-\ln\left\{(1-p_{CN})\exp\left(-\frac{\varepsilon_i^{\,2}}{2}\right)+\frac{p_{CN}}{b_{CN}}\exp\left(-\frac{\varepsilon_i^{\,2}}{2b_{CN}^{\,2}}\right)\right\} \tag{3.5}$$

2. Lorentzian distribution function

$$-\frac{1}{1+\left(\varepsilon_i^2/2c_L^2\right)} \tag{3.6}$$

3. Hampel's redescending M-estimator

$$\frac{1}{2}\varepsilon_i^{\,2} \quad ,0\le|\varepsilon_i|\le a_H$$

$$a_H|\varepsilon_i|-\frac{1}{2}a_H^2, \quad a_H<|\varepsilon_i|\le b_H$$

$$a_Hb_H-\frac{a_H^2}{2}+(c_H-b_H)\frac{a^2}{2}\left[1-\left(\frac{c_H-|\varepsilon_i|}{c_H-b_H}\right)^2\right], \quad b_H<|\varepsilon_i|\le c_H$$

$$a_Hb_H-\frac{1}{2}a_H^2+(c_H-b_H)\frac{1}{2}a^2, \quad c_H<|\varepsilon_i| \tag{3.7}$$

เมื่อ $\varepsilon_i=(y_i-x_i)/\sigma_i$ คือ ความผิดพลาดมาตรฐาน

$b_{CN},p_{CN},c_L,a_H,b_H,c_H$ คือ ค่าคงที่ของฟังก์ชันการกระจายตัวแต่ละแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ที่ใช้ในการประมาณความน่าจะเป็นสูงสุด

ฟังก์ชันการกระจายตัว	ค่าคงที่
Contaminated normal distribution function	$b_{CN} = 10$, $p_{CN} = 0.235$
Lorentzian distribution function	$c_L = 2.6$
Hampel's redescending M-estimator	$a_H = 1.35$, $b_H = 2.7$, $c_H = 5.4$

3.3 การตรวจจับความผิดพลาดชัดเจน (Gross Error Detection)

ประเภทของความผิดพลาดชัดเจนมีอยู่ 2 ประเภทหลักๆ ประเภทแรกเกี่ยวกับผลของเครื่องมือและรวมถึงความเอนเอียงของการวัด อาจเกิดจากการปรับเพื่อแก้ไขทำผิดพลาด และความล้มเหลวของเครื่องมือทั้งหมด ประเภทที่ 2 เป็นการบังคับที่เกี่ยวกับแบบจำลอง และรวมถึงการไม่อธิบายความสูญเสียของวัตถุดิบและพลังงานที่เป็นผลมาจากการรั่วไหลของเครื่องมือในกระบวนการ หรือความผิดพลาดของแบบจำลองเนื่องจากตัวแปรผิดพลาด โดยทั่วไปความผิดพลาดชัดเจนจะเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดของเครื่องส่งสัญญาณ

เทคนิคต่างๆ ถูกออกแบบมาเพื่อค้นหาและกำจัดความผิดพลาดชัดเจนทั้ง 2 ประเภทนี้ โดยใช้การทดสอบทางสถิติ วิธีการค้นหาความผิดพลาดชัดเจน ควรจะเลือกกระบวนการตามความสามารถ เช่น

- ความสามารถในการค้นหาความผิดพลาดชัดเจนที่มีอยู่หนึ่งค่าหรือมากกว่าในข้อมูล (ปัญหาของการค้นหา)
- ความสามารถในการระบุประเภทและที่ตั้งของความผิดพลาด (ปัญหาที่ต้องมีการระบุ)
- ความสามารถในการระบุที่ตั้งและระบุความผิดพลาดชัดเจนต่างๆ ซึ่งอาจจะแสดงพร้อมกันในข้อมูล (ปัญหาการระบุความผิดพลาดชัดเจนต่างๆ)
- ความสามารถในการประมาณขนาดของความผิดพลาด (ปัญหาการประมาณ)

การทดสอบทางสถิติ ได้รับมาจากหลักการทางสถิติพื้นฐานและความสามารถในการค้นหาความผิดพลาดชัดเจน แต่ไม่ใช่การทดสอบทางสถิติทั้งหมด ที่จะสามารถระบุความแตกต่างของประเภทและที่ตั้งของความผิดพลาดชัดเจน การทดสอบทางสถิติพื้นฐานบางอย่างสามารถค้นหาได้เพียงความผิดพลาดจากการวัดเท่านั้น การทดสอบทางสถิติบางอย่างสามารถค้นหาได้เพียงความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการหรือการรั่วเท่านั้น ซึ่งได้มาจากหลักการการประมาณความน่าจะเป็นสูงสุดในทางสถิติ สามารถนำมาใช้ค้นหาได้ทั้งปัญหาจากเครื่องมือและการรั่วของกระบวนการ

3.4 ประโยชน์จากการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลและการตรวจจับความผิดพลาดชัดเจน

1. การปรับให้สอดคล้องของข้อมูล มีประโยชน์อย่างมากในการกำหนดการบำรุงรักษาของเครื่องมือในกระบวนการ ข้อมูลที่มีความสอดคล้องสามารถใช้ในการประมาณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2. วิธีการควบคุมขั้นสูง เช่น การควบคุมบนพื้นฐานของแบบจำลอง ต้องการการประมาณที่ถูกต้องแม่นยำของตัวแปรควบคุม วิธีการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงถูกนำมาใช้เพื่อให้ได้รับการประมาณที่ถูกต้องแม่นยำสำหรับการควบคุมกระบวนการที่ดีขึ้น

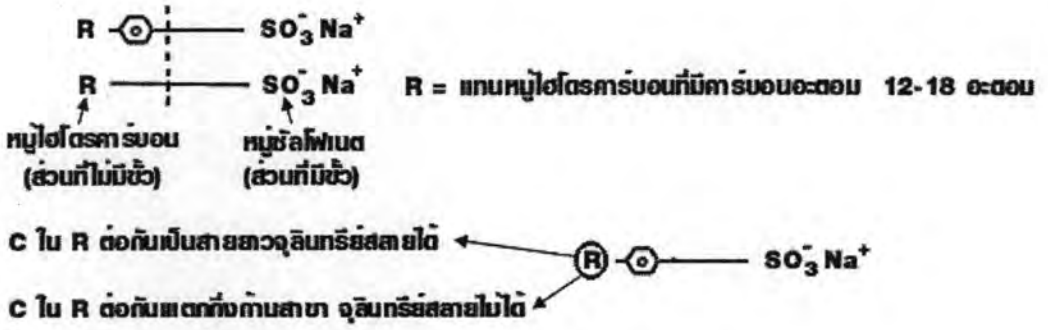
3. การค้นหาความผิดพลาดชัดเจน ไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงความถูกต้องแม่นยำของวิธีการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล แต่มันยังมีประโยชน์ในการระบุให้เห็นถึงปัญหาของเครื่องมือที่อาจต้องการการบำรุงรักษาเป็นพิเศษและการทำให้ถูกต้อง การค้นหาตั้งแต่เริ่มเกิดของความผิดพลาดชัดเจน จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและช่วยให้การทำงานของโรงงานราบรื่นขึ้น วิธีการนี้ยังสามารถค้นหาความบกพร่องผิดพลาดของเครื่องมือได้ด้วย

การประยุกต์ใช้ เช่น การเลียนแบบ และการออฟติไมเซชันในกระบวนการขึ้นอยู่กับแบบจำลอง แบบจำลองโดยทั่วไปจะประกอบด้วยตัวแปร ซึ่งต้องประมาณจากข้อมูลของโรงงาน รู้ได้โดยการปรับให้สอดคล้องของแบบจำลอง ข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำเป็นสิ่งสำคัญ การใช้ข้อมูลการวัดที่ผิดพลาดในการปรับให้สอดคล้องของแบบจำลอง จะทำให้ตัวแปรของแบบจำลองไม่ถูกต้อง ซึ่งจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้

3.5 ผงซักฟอก

ผงซักฟอกเป็นสินค้าอุปโภคชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับชำระล้างสิ่งสกปรกออกจากเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ตลอดจนสามารถใช้ชำระล้างทำความสะอาดเครื่องใช้ต่างๆ ได้อีกด้วย ผงซักฟอกผลิตขึ้นมาใช้แทนสบู่ครั้งแรกในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 และต่อมาได้ปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบันผงซักฟอกได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทำให้เกิดการแข่งขันในตลาดค่อนข้างสูง ผู้ผลิตจึงต้องปรับปรุงคุณภาพและรูปลักษณ์อยู่เสมอๆ จึงทำให้ในปัจจุบันได้มีผงซักฟอกสูตรต่างๆ วางขายกันตามท้องตลาดมากมาย

ผงซักฟอก คือเกลือของกรดซัลโฟนิกมีคุณสมบัติในการชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายได้เช่นเดียวกับสบู่ สูตรโครงสร้างของผงซักฟอก เป็นดังนี้



รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างของผงซักฟอก

ผงซักฟอก มีส่วนประกอบ 2 ชนิด คือ สารประกอบหลักและสารประกอบรอง สารประกอบหลักมี 5 ชนิดคือ

1. สารลดแรงตึงผิว เป็นหัวใจของผงซักฟอก เพราะเป็นตัวที่ทำให้คราบสกปรกที่ติดอยู่กับเนื้อผ้าหลุดออกได้ง่าย ปัจจุบันผู้ผลิตได้ใช้สารลิเนียอัลคีลเบนซีนซัลโฟเนท (Linear Alkylbenzensulfonate หรือ LAS) สารลดความตึงผิวสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ คือ

- สารลดความตึงผิวประเภทแอนไอออน (anionic surfactants) สารลดความตึงผิวประเภทนี้มีประจุไฟฟ้าลบ (-) มีความสามารถในการชำระล้างคราบสกปรกประเภทดินโคลน ออกจากผ้าฝ้ายและเส้นใยธรรมชาติอื่นๆได้ดีเป็นพิเศษ มีฟองมาก และจะทำงานได้ดีในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง แต่ใช้ไม่ดีในน้ำกระด้าง

- สารลดความตึงผิวประเภทนอนไอออน (nonionic sufactants) สารลดความตึงผิวนี้ไม่มีประจุไฟฟ้า มีฟองน้อย ทำงานได้ดีในทุกสภาพน้ำ ไม่จำเป็นต้องเติมสารที่ทำให้น้ำอ่อน ดังเช่น ประเภทแอนไอออน สารประเภทนอนไอออนนี้จะมีความสามารถในการชำระคราบไขมันออกจากพอลิเอสเตอร์และเส้นใยสังเคราะห์อื่นๆ ได้ดีเป็นพิเศษ

- สารลดความตึงผิวประเภทแคตไอออน (cationic surfactants) สารลดความตึงผิวประเภทนี้มีประจุไฟฟ้าบวก (+) นิยมผสมในน้ำยาปรับผ้านุ่ม (fabric softeners) มากกว่าสารซักฟอกเพราะ ประจุไฟฟ้าบวกจะไปช่วยทำให้เกิดความสมดุลหลังจากเสื้อผ้าได้รับประจุไฟฟ้าลบในระหว่างการซัก

2. สารลดความกระด้างของน้ำ สารนี้ไม่ได้ช่วยให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากเนื้อผ้าโดยตรง แต่จะช่วยให้สารลดแรงตึงผิวมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยจะรักษาสมดุลความเป็นกรดด่างของน้ำ และช่วยทำให้น้ำลดความกระด้างลง จึงทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากเนื้อผ้าได้โดยง่าย สารที่ผู้ผลิตนิยมใช้กันมากที่สุดก็คือ โซเดียมไทรโพลิฟอสเฟต (Sodium Tripolyphosphate : STPP) สารนี้ใส่เพื่อลดความกระด้างของน้ำ เป็นตัวช่วยให้น้ำเป็นด่างเพื่อให้ผงซักฟอกทำงานดีขึ้น

และเป็นตัวกันสิ่งสกปรกที่หลุดออกไม่ให้กลับมาจับที่ผ้าอีก สารนี้ลดความกระด้างได้ผลเป็นอย่างดี

3. สารป้องกันการตกตะกอน ใส่เพื่อมิให้เกิดตะกอนขึ้นระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ปัจจุบันใช้โซเดียมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose)

4. สารที่ทำหน้าที่กันสนิมหรือรักษาความเป็นด่าง สารนี้จะรักษาความเป็นด่างของผงซักฟอกตลอดการซักทำให้ ผงซักฟอกไม่กัดภาชนะที่ซัก และช่วยทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอร์เนต

5. สารเพิ่มความสดใส มีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอุลตราไวโอเลตจากแสงอาทิตย์ทำให้เกิดการเรืองแสงและสะท้อนเข้าตา ทำให้ดูเหมือนผ้าขาวสดใส

นอกจากสารประกอบหลักทั้ง 5 ชนิดนี้แล้วยังมีสารอื่นๆ ที่เป็นสารประกอบรองที่ผู้ผลิตได้ใส่ลงไปในผงซักฟอกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผงซักฟอกและ ดึงดูดใจลูกค้าซึ่งสารเหล่านี้ได้เติมเพียงเล็กน้อยเท่านั้นสารเหล่านี้ ได้แก่

1. สารควบคุมการเกิดฟอง นิยมใช้สบู่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งทำจากไขวัว หรือ Behenic Acid มี 2 ประเภทคือ

- สารเพิ่มฟอง นิยมเติมในผงซักฟอกที่ซักด้วยมือเพราะเมื่อเวลาซักจะมีฟองเยอะทำให้รู้สึกว่าออกแรงน้อย

- สารลดฟอง นิยมเติมในผงซักฟอกที่ซักด้วยเครื่อง เพื่อป้องกันการเกิดฟองล้นออกมานอกเครื่องซักผ้า

2. สารเร่งการฟอก (Bleach actibator) ใส่เพื่อขจัดรอยเปื้อนโดยไม่ทำลายเส้นใย ได้แก่โซเดียมเพอร์โบเรต (Sodium perboraste)

3. สารช่วยละลาย (Hudrotrope) ใส่เพื่อให้ผงซักฟอกละลายน้ำได้ดีขึ้น ได้แก่ โซเดียมโทโลอิน หรือไซลีนซัลโฟเนต

4. สารแอนติออกซิแดนซ์ ใส่เพื่อยับยั้งการเกิดออกซิเดชั่น

5. เอนไซม์ (Enzyme) เป็นสารอินทรีย์ที่ช่วยย่อยโมเลกุลของแป้ง โปรตีน ไขมัน รวมทั้งคราบโลหิต

6. น้ำหอม

7. สี ใส่เพื่อให้น่าใช้ดูสะอาด

8. สารป้องกันการคืนกลับ สารตัวนี้ใส่เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกที่หลุดออกมาไม่ให้ไหลย้อนกลับ มาเกาะบนเนื้อผ้าอีก นิยมใช้สารโซเดียมคาร์บอกซิเมเทิลดรอกซีเอทเซลลูโลส (Sodiumcaboxymethyldroxyethylcellulose)

3.6 กระบวนการผลิตผงซักฟอก [7]

สารตั้งต้นในการผลิตผงซักฟอกมี 2 ชนิด คือ

1. Branched alkyl benzene (BAB) สารตั้งต้นชนิดนี้เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมมาก เพราะทำให้เกิดฟองและสลายตัวยาวนาน เกิดน้ำเสียและทำลายสิ่งมีชีวิตในน้ำ

2. Linear alkyl benzene (LAB) สารตั้งต้นชนิดนี้สามารถแก้ปัญหาของ BAB ได้ แต่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า BAB ประมาณร้อยละ 10 - 25

ปัจจุบันโรงงานผลิตผงซักฟอกทั้งหมดภายในประเทศ ผลิตผงซักฟอกโดยใช้กระบวนการผลิตแบบ LAB เพื่อให้ตรงตามมาตรฐานผงซักฟอกที่กำหนดให้ใช้สารลดแรงตึงผิวประเภท LAB เพื่อแก้ปัญหามลพิษตั้งแต่ปลายปี 2528 ซึ่งมีกระบวนการผลิตเป็นลำดับขั้นตอนดังนี้

1. Sulphonation – sulphation โดยนำ LAB ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมมาทำปฏิกิริยากับโอเลียมหรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2. Neutralization คือนำวัตถุดิบที่ได้จากขั้นที่ 1 มาทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซดาไฟ (caustic soda) เพื่อเปลี่ยนกรดซัลโฟนิก (Sulphonic acid) ให้เป็นเกลือโซเดียม (Soduim salt) ซึ่งเป็นสารช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ ในขั้นนี้ยังช่วยกำจัดกรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid) ให้หมดไปด้วยเพราะกรดซัลฟิวริกจะเป็นอันตรายต่อเส้นใยของผ้าและผิวหนังของคน

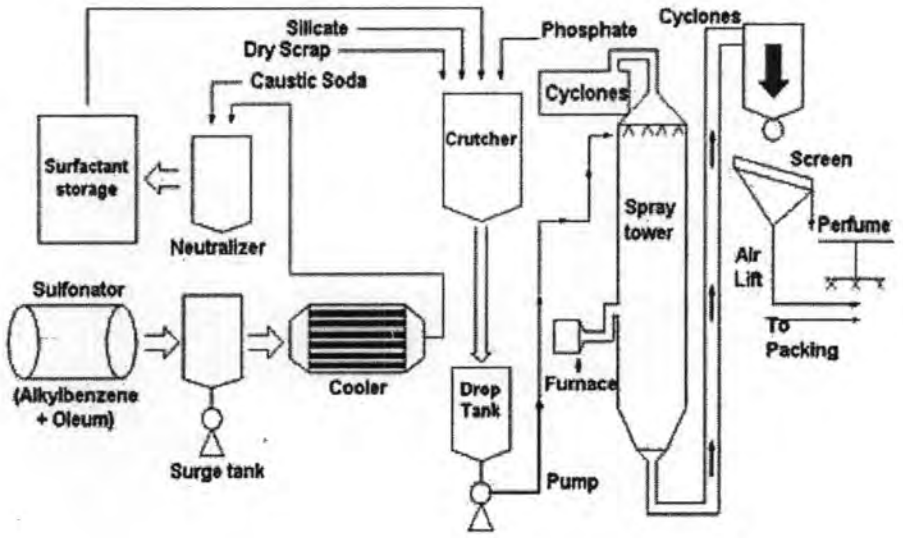
3. Crutching คือนำวัตถุดิบในขั้นที่ 2 มาผสมกับสารลดความกระด้างของน้ำ เช่น STPP ซีโอไลต์ ซิลิเคต และสารเติมแต่งอื่นอีกหลายชนิดตามสูตรของแต่ละโรงงาน เพื่อช่วยให้การซักฟอกมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น สารผสมที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวข้นๆ คล้ายแป้งเปียก (Paste) เก็บไว้ในถังซึ่งอยู่ในระดับต่ำ (Drop tank)

4. สูบ (Pump) สารผสมที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้นขึ้นไปยังหอสูง (Spray tower) เพื่อนำไปฉีดพ่น (Spraying) ให้เป็นเม็ดด้วยความดันสูง ซึ่งปกติหอสูงจะมีความสูงประมาณ 80 ฟุต เมื่อสารผสมที่ถูกฉีดออกมาปะทะกับลมร้อนก็จะกลายเป็นเม็ดผงซักฟอกเล็กๆ มีลักษณะแห้ง (Dried granules) และนำเม็ดผงซักฟอกที่มีขนาดใหญ่เกินความต้องการไปหลอมตัวเป็นของเหลวใหม่ในขั้นที่ 3 ก่อนส่งกลับขึ้นมายังหอสูงเพื่อฉีดเป็นเม็ดให้ได้ขนาดตามความต้องการต่อไป

5. เม็ดผงซักฟอกเล็กๆ ที่ได้จะเคลื่อนไปยังไซโคลนโดยการดันขึ้นไปของลมเย็น เพื่อไล่ความชื้นและแยกเม็ดผงซักฟอกให้ได้ตามขนาดที่ต้องการโดยผ่านตะแกรง

6. นำเม็ดผงซักฟอกที่ได้ขนาดไปผ่านการฉีดน้ำหอมเพื่อช่วยให้ผ้าหรือสิ่งชำระล้างมีกลิ่นหอม

7. ตรวจสอบคุณภาพและนำไปบรรจุใส่กล่องหรือซองให้ได้ขนาดและน้ำหนักต่างๆ ตามที่ต้องการแล้วบรรจุใส่หีบเพื่อรอการจำหน่าย



รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตผงซักฟอก

3.7 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

การอบแห้งแบบพ่นฝอย หมายถึงการแปลงของเหลวซึ่งอาจเป็นสารละลายหรือของเหลวข้นให้เปลี่ยนสภาพเป็นผงแห้งเพียงขั้นตอนเดียว หลักการพื้นฐานของการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้น อาหารเหลวจะถูกฉีดให้เป็นละอองและสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลเข้ามา ทำให้เกิดการระเหยน้ำอย่างรวดเร็วเนื่องจากละอองฝอยมีพื้นที่ผิวมาก จากนั้นจะได้ผงแห้งตกลงมาและผงนี้จะถูกแยกจากลมร้อนเพื่อนำไปบรรจุต่อไป ขนาดของอนุภาคที่ได้มีค่าระหว่าง 50–500 μm การอบแห้งแบบพ่นฝอยมีจุดเด่นดังต่อไปนี้

- เนื่องจากของเหลวถูกพ่นฝอยให้เป็นละอองขนาดเล็กมากก่อนอบแห้ง ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงมีความเร็วสูงและเวลาที่ใช้อบแห้งสั้นประมาณ 5-30 วินาที ด้วยเหตุนี้จึงสามารถอบแห้งได้แห้งได้แม้กระทั้งวัสดุที่เสียหายง่ายจากความร้อน

- เนื่องจากสามารถผลิตผลิตภัณฑ์แห้งให้เป็นอนุภาคทรงกลมที่มีตรงกลางกลวง จึงสามารถปรับขนาดอนุภาคและปรับความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) ของชั้นอนุภาคให้อยู่ในช่วง 0.25–0.35 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรได้

- เนื่องจากสามารถทำผลิตภัณฑ์ในรูปเม็ดและผงได้โดยตรงจากวัสดุเหลว จึงสามารถประหยัดอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ที่ต้องใช้ในการทำเม็ดหรือผง

หลักการพื้นฐานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย คือการฉีดพ่นของเหลวผ่านหัวทำละอองฝอยให้มีลักษณะเป็นละอองของเหลวเล็กๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-20 ไมครอน เข้าไปในอากาศร้อน (อากาศที่ผ่านฮีทเตอร์) โดยผสมกันภายในภาชนะอบแห้ง (drying

chamber) เป็นเวลา 1-10 วินาที จนกระทั่งไอน้ำในสารละลายถูกระเหยออกไป ทำให้ได้ผงผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแห้ง แยกตัวออกมาแล้วตกลงสู่ส่วนเก็บผลิตภัณฑ์ ส่วนอากาศที่ไม่ใช้จะถูกพัดลมดูดออกไป

3.7.1 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแต่ละเครื่อง จะมีส่วนประกอบของเครื่องไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบและประโยชน์ใช้สอย ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยคือ

1. เครื่องทำอากาศร้อน (air heater) อากาศสะอาดจะถูกทำให้ร้อนโดยก๊าซหรือน้ำมัน ซึ่งอาจทำให้ร้อนโดยเปลวไฟโดยตรงหรือผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (การทำให้ร้อนโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกที่อาจแปลกปลอมเข้ามาเกาะติดกับผลิตภัณฑ์ เช่น ฝุ่นละออง ฝุ่นจากการเผาไหม้ และป้องกันการที่ผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับสิ่งสกปรก อาจจะทำให้มีกลิ่นแทรกซ้อนที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น) ซึ่งอากาศร้อนจะเป็นตัวทำให้ของเหลวแห้งกลายเป็นผง

2. เครื่องทำละอองฝอย (atomizer) ทำหน้าที่พ่นของเหลวเป็นฝอย เพื่อให้สามารถระเหยน้ำออกจากของเหลวได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากของเหลวมีขนาดเล็กลง และจะเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับความร้อนได้มาก ทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การฉีดของเหลวให้เป็นละอองฝอยอาจใช้หัวฉีด ซึ่งมีแรงดันจากเครื่องสูบของเหลว (feed pump) หรือแรงดันจากเครื่องอัดอากาศ (air compressor) หน้าที่อีกประการของเครื่องทำละอองฝอยคือ เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของของเหลว เครื่องทำละอองฝอยแบ่งเป็น 3 แบบ คือ

- เครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยความดัน (Pressure nozzle)

การพ่นฝอยแบบนี้จะให้ความดันสูง เพื่อให้ของเหลวที่ส่งเข้ามามีลักษณะเป็นละอองเล็กๆ เครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยความดันจะมีช่องเปิดเล็กๆ ตรงกลางมีแกนกั้นไว้ และแกนนี้จะหมุนได้รอบเมื่อของเหลวฉีดผ่านมา การฉีดของไหลผ่านมาจะใช้ความดันตั้งแต่ 500-700 Psig ค่าความดันขึ้นอยู่กับช่องเปิดแกนกลาง ขนาดของละอองที่ต้องการ และอัตราของของไหลที่เข้าไปในภาชนะอบแห้ง ความจุของเครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยความดัน จะขึ้นอยู่กับช่องเปิดและแกนกลางเป็นสำคัญ เครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยความดันนี้มีทั้งแบบเกียร์ที่ให้ความร้อนต่ำและแบบลูกสูบที่ให้แรงดันสูง

- เครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยความดันชนิด 2 ช่องเปิด (Two fluid spray nozzle)

เป็นระบบที่มีการใช้อากาศช่วยในการป้อนวัตถุดิบ ให้กระจายเข้าไปในภาชนะอบแห้ง ความดันที่ใช้ในการเดินเครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยความดันชนิด 2 ช่องเปิดนี้ จะ

ต่ำเพียงไม่กี่ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ลักษณะของเครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดความดันชนิด 2 ช่องเปิดจะประกอบกันอย่างง่ายๆ มีช่องเปิดให้ของเหลวไหลออกและมีช่องเปิดอีก 2 ช่องข้างๆ เพื่อให้อากาศที่มีความกดดันพุ่งออกมา เอาของเหลวกลายเป็นละอองเล็กๆ วิ่งเป็นวงกลมอยู่ในภาชนะอบแห้ง เครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยความดันชนิด 2 ช่องเปิดนี้ มีข้อดีตรงที่สามารถปรับขนาดของละอองได้

- เครื่องทำละอองฝอยแบบจานหมุน (centrifugal atomizer)

เป็นระบบที่ใช้แรงเหวี่ยง ให้เครื่องทำละอองฝอยป้อนวัตถุดิบเข้าในภาชนะอบแห้ง ลักษณะการทำงานของเครื่องทำละอองฝอยแบบจานหมุนมี 3 แบบ คือ ของเหลวที่จะทำให้แห้งถูกพ่นออกเป็นฟิล์มบนผิวจานที่หมุนอยู่ตลอดเวลา (rotary disc) ซึ่งฟิล์มบางๆ ของของเหลวจะกระจายออกเป็นละออง ของเหลวที่จะถูกทำให้แห้งถูกส่งไปยัง rotary vane ซึ่งของเหลวจะถูกทำให้กระจายออกมาเป็นละออง และของเหลวที่จะทำให้แห้งถูกส่งไปยัง rotary vane แล้วจึงใช้ความดันทำให้กระจายออกมาเป็นละออง

การใช้เครื่องทำละอองฝอยแบบจานหมุนนี้ จะให้ขนาดของผงแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดของเครื่องทำละอองฝอยซึ่งมีความเร็วต่างกัน เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบจานหมุนที่ใช้ในห้อง ปฏิบัติการจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร จะหมุนด้วยความเร็ว 50,000 รอบต่อนาที โดยใช้ลมเป็นตัวเป่าให้เครื่องทำละอองฝอยหมุน แต่ถ้าเป็นเครื่องทำละอองฝอยที่ใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 นิ้ว (76.2 ซม.) ขึ้นไป จะหมุนด้วยความเร็ว 3,450 รอบต่อนาที ฉะนั้นจึงต้องใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขุด

3. ภาชนะอบแห้ง (drying chamber) ภาชนะอบแห้งมีขึ้นเพื่อเป็นที่ที่อากาศร้อนและละอองของผลิตภัณฑ์จะมาสัมผัสกัน จนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างพอเพียงและมีลักษณะเป็นผงตามที่ต้องการ ภาชนะอบแห้งจะมีรูปร่างหลายอย่างแตกต่างกันออกไปขึ้นกับการใช้งานซึ่งทั้งนี้เกี่ยวข้องกับการไหลของอากาศ และละอองผลิตภัณฑ์ในภาชนะอบแห้งนั้นๆ การออกแบบภาชนะอบแห้งนั้น สามารถแบ่งตามลักษณะของกระแสละอองผลิตภัณฑ์เหลวที่พ่นออกมากับกระแสของอากาศร้อนได้ 3 แบบ ดังนี้

- การป้อนของเหลวข้นในทิศทางเดียวกับอากาศร้อน (co-current) ของเหลวข้นจะถูกพ่นฝอยโดยอนุภาคของเหลวจะแขวนลอยในอากาศร้อน ทำให้เกิดการระเหยน้ำออกจนเป็นผง ลักษณะนี้จะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ทนต่อความร้อนสูง ผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าลมร้อนที่ออกจากเครื่องและมีคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งสูง การใช้ประโยชน์ของลมร้อนอาจจะไม่มีประสิทธิภาพมากนัก จะมีค่าความเร็วลมระหว่าง 2.1-3.0 เมตรต่อวินาที

- การป้อนของเหลวข้นสวนทางกับอากาศร้อน (counter current) ของเหลวข้นจะถูกพ่นฝอยสวนทางกับอากาศร้อน โดยเริ่มจากอนุภาคของของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำจะค่อยๆ สูงขึ้น

จนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อน ลักษณะนี้จะมีการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนสูง และต้องการความร้อนมากเพื่อที่ให้ได้ลักษณะหรือคุณภาพบางอย่างที่ต้องการ เช่น ความโปร่งมากขึ้น หรือความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) ลดลง แต่ก็มีข้อเสียคือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งอาจไม่ดีนัก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนที่แห้งจะสัมผัสกับอากาศร้อนจัด นอกจากนี้อัตราการไหลของอากาศต้องไม่สูงมากนัก เพื่อป้องกันการพัดพาเอาผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วออกจากเครื่องอบแห้ง

- แบบผสม (mixed-flow) เป็นการผสมของสองแบบแรกจะใช้ลักษณะนี้เมื่อต้องการอนุภาคที่หยาบและผลิตภัณฑ์ต้องทนต่อความร้อนสูง นอกจากนี้ลักษณะของการสัมผัสระหว่างอากาศร้อนและผลิตภัณฑ์เหลวแต่ละแบบ จะให้การกระจายค่าอุณหภูมิแตกต่างกันออกไป จึงควรคำนึงถึงลักษณะดังกล่าวก่อนเลือกใช้ลักษณะการสัมผัสของอากาศร้อนและผลิตภัณฑ์เหลวในแต่ละประเภท

ปรากฏการณ์การระเหย (evaporative phenomena) การระเหยเริ่มต้นจากไอน้ำที่อิ่มตัวซึ่งจะเริ่มก่อตัวที่บริเวณผิวของหยดหรืออนุภาคของเหลวหยดของเหลวตรงส่วนผิวจะมีอุณหภูมิต่ำซึ่งจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อนที่ใช้ การออกแบบภาชนะอบแห้งจะต้องออกแบบให้มีระยะเวลานานพอสมควรที่ผลิตภัณฑ์จะตกลงสู่ด้านล่างของถังอบแห้ง แต่ก็ไม่นานเกินไปเพราะผงอาจไหม้ได้ ภาชนะอบแห้งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แหล่งให้ความร้อน ซึ่งอาจใช้ไฟฟ้าหรือก๊าซ และพัดลมทำหน้าที่เป่าลมร้อนหรือดูดผลิตภัณฑ์ผงที่แห้งออกมา ถ้าของเหลวพ่นไปอย่างสม่ำเสมอและมีการผสมกับอากาศร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ อาหารแห้งจะเป็นผงภายในไม่กี่วินาที การระเหยของน้ำจากการอบแห้งแบบพ่นฝอย จะเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร การสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับอากาศร้อน จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังหยดโดยการพา และจะเปลี่ยนเป็นความร้อนแฝงเพื่อให้ความชื้นระเหยออกมายังอากาศ โดยการพาผ่านชั้นบางๆ รอบหยด อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารจะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ความชื้น ขนาดของหยด และความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศกับหยด การระเหยความชื้นจากหยด จะเกิดเมื่อหยดสัมผัสกับอากาศร้อน

ความร้อนชื้น (humid heat)(C_s) คือความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณภูมิในหนึ่งหน่วยมวลสารของอากาศและไอของสารนั้นสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส ที่ความดันคงที่ โดยที่

$$C_s = 0.24 + 0.46H_a \tag{3.8}$$

ความร้อนชื้นนี้ใช้ในการคำนวณความร้อนสำหรับการทำให้อากาศและไอน้ำมีอุณภูมิสูงขึ้น

$$Q_a = mC_s\Delta T \qquad (3.9)$$

สมการนี้จะใช้ได้เมื่อไม่มีการควบแน่นและการระเหยเกิดขึ้น ค่าเอนทาลปีของส่วนผสมของอากาศและไอน้ำ จะเท่ากับผลรวมของเอนทาลปีของอากาศกับเอนทาลปีของไอ ค่าเอนทาลปีนี้มีความสัมพันธ์กับอุณภูมิที่อ้างถึง (T_r) เช่น ค่าเอนทาลปีของอากาศและน้ำอิ่มตัวที่ 0 องศาเซลเซียส (32 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับระบบอากาศและไอน้ำ

$$Q_a = (0.24 + 0.46H_a)(T - T_r) + \lambda H_a \qquad (3.10)$$

ณ λ ที่อุณภูมิที่อ้างถึง

4. ภาชนะเก็บผลิตภัณฑ์ (product collector) การรวบรวมเก็บผลิตภัณฑ์นั้นมีวิธีการต่างๆ กันออกไป แล้วแต่ชนิดของอุตสาหกรรม ผงของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในภาชนะอบแห้งมักจะถูกเก็บโดยใช้ไซโคลน (cyclone) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กันอยู่โดยทั่วไป ไซโคลนจะมีลักษณะเป็นรูปกรวย ซึ่งอากาศจะพุ่งเข้าไปขนานกับฝาของไซโคลน หมุนเวียนลึกลงไปที่ฐานของไซโคลน และหมุนวนกลับขึ้นมาอีกครั้งหนึ่ง ลมจะออกไปยังทางออก (outlet) ที่อยู่ด้านบน ผงของผลิตภัณฑ์ในอากาศหมุนจะหมุนตกลงที่ใต้ไซโคลน อากาศที่หมุนออกไปยังทางออกยังคงมีผงผลิตภัณฑ์อยู่ ซึ่งอาจเก็บได้โดยใช้ถุงกรอง (bag filter) หรือ scrubber

ชนิดของไซโคลนนอกจากมี common cyclone หรือ dry cyclone แล้วยังมี wet cyclone โดยนำอากาศร้อนที่ออกจาก dry cyclone มาผ่าน wet cyclone อีกครั้งหนึ่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยบางระบบ ต้องการออกแบบให้ภาชนะอบแห้งสามารถเป็นที่เก็บผลิตภัณฑ์ได้ด้วย หรือในบางกรณีเมื่อผงผลิตภัณฑ์ตกลงมาที่ก้นของภาชนะอบแห้งแล้วอาจจะต่อกับเครื่อง pneumatic powder conveyer อีกทีหนึ่ง ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปกระแสลมร้อนจะผ่านไซโคลนหลายลูก เพื่อเก็บผงผลิตภัณฑ์ให้มากที่สุดก่อนจะปล่อยทิ้งไป ในบางครั้งอาจใช้ระบบการเก็บผลิตภัณฑ์ เพื่อที่จะลำดับขนาดของผงผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาว่าอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่ โดยใช้ลักษณะทางฟิสิกส์เป็นหลัก ผลิตภัณฑ์บางอย่างก็อาจจะนำกลับมาทำแห้งโดยการทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยใหม่ได้ แต่บางอย่างก็ทำเช่นนั้นไม่ได้เพราะว่าคุณภาพจะเสื่อมไป

ระบบในการแยกเอาผงที่ลอยตัวอยู่ในอากาศออกจากภาชนะอบแห้งมี 2 ระบบ คือ

- แบบมีช่อง 2 จุด ช่องทางออกแรกจะเป็นทางออกสำหรับผงผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะตกอยู่ภายในภาชนะของภาชนะอบแห้งโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ส่วนผงขนาดเล็ก

จะถูกลมดูดออกจากภาชนะอบแห้งและแยกจากลมร้อนด้วยไซโคลน ซึ่งทั้งตำแหน่งของการเก็บผงผลิตภัณฑ์ และประเภทการเก็บผงผลิตภัณฑ์ของไซโคลนมีด้วยกันหลายลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบการใช้งานในแต่ละประเภท

- แบบที่มีช่องทางออกทางเดียว ผลิตภัณฑ์ผงทั้งหมดจะถูกแยกโดยไซโคลนหรือถุงกรองหรือเครื่องทำให้ผงตกลงมาโดยอาศัยไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator)

3.7.2 ลักษณะสมบัติการอบแห้งของหยดของเหลว

ของเหลวที่อบแห้งโดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีมากมายหลายประเภท ดังนั้นการอธิบายลักษณะสมบัติการอบแห้งของหยดของเหลวอย่างเป็นระบบจึงทำได้ลำบาก ในกรณีที่เป็นสารละลายแขวนลอยของอนุภาคขนาดเล็ก จะมีช่วงการระเหยน้ำจากผิววัสดุเกิดขึ้น และในช่วงการอบแห้งที่อัตราช้าลง อัตราการระเหยจะแปรผันโดยตรงตามอัตราส่วนความชื้นในวัสดุที่ลดลง ส่วนในกรณีของสารละลายโพลีเมอร์ ผลิตภัณฑ์อาหารเหลว เป็นต้น ช่วงการระเหยน้ำจากผิวจะสั้นและมักเกิดเปลือกแข็ง (case hardening) หุ้มผิวนอกของหยดในขณะที่อบแห้ง เปลือกแข็งที่เกิดขึ้นนี้ จะไปลดอัตราการถ่ายเทของน้ำภายในหยดอย่างมาก เมื่อการอบแห้งเริ่มเข้าช่วงที่อัตราช้าลง อุณหภูมิของหยดจะพุ่งขึ้นจนถึงจุดเดือด ทำให้ความดันภายในหยดเพิ่มสูงขึ้น ผลก็คือจะเกิดการพองตัวของหยดหรือการแตกร้าวของหยด การเปลี่ยนแปลงสภาวะดังกล่าวของหยดของเหลวในระหว่างการอบแห้ง จะมีผลอย่างมากต่อความหนาแน่นปรากฏ และความสามารถในการละลายของอนุภาคที่แห้งแล้ว

3.7.3 การคำนวณออกแบบภาชนะอบแห้งแบบพ่นฝอย

เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิ และการกระจายของความเร็วของลมร้อน ตลอดจนภาวะการสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับลมร้อนภายในภาชนะอบแห้งแบบพ่นฝอยยังมีอีกมากที่ยังไม่เป็นที่กระจ่างชัด ดังนั้นจึงยังไม่มีวิธีการคำนวณออกแบบที่ถูกต้องที่สุดในเชิงทฤษฎี อย่างไรก็ดีการคำนวณออกแบบภาชนะอบแห้งแบบพ่นฝอย สามารถกระทำได้โดยอาศัยวิธีข้างล่างนี้

- คำนวณหาระยะทางวิ่งในแนวระดับของหยดที่ฉีดออกมา โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการพ่นฝอย แล้วกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมของภาชนะอบแห้ง

- โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (h_a) คำนวณหาปริมาตรของภาชนะอบแห้งที่ต้องใช้ แล้วคำนวณหาความยาว (ความสูง) ของภาชนะอบแห้ง โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่หาได้จากข้างบน โดยทั่วไปค่าของ h_a จะมีค่าประมาณ 10-25 kcal/hr.m^3.°c

3.7.4 สมดุลความร้อนและสมดุลมวลสารที่ภาชนะอบแห้ง

สมดุลความร้อนและสมดุลมวลสารจะทราบจากข้อมูลของอากาศที่ไหลผ่าน และอุณหภูมิตรงทางเข้าของภาชนะอบแห้ง ถ้าเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องและไม่มีผลิตภัณฑ์สะสมในภาชนะอบแห้ง มวลของอากาศและวัสดุที่เข้าในหนึ่งหน่วยเวลามีค่าเท่ากับมวลของอากาศและผลิตภัณฑ์ที่ออก ความร้อนของอากาศและวัสดุในหนึ่งหน่วยเวลา จะมีค่าเท่ากับความร้อนของอากาศและผลิตภัณฑ์ที่ออกรวมกับความร้อนที่สูญเสียไปจากภาชนะอบแห้ง สำหรับระบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่เข้าและออกจะมีค่าเท่ากับการสะสม (accumulation)

สมดุลมวลสาร (mass balance) น้ำหนักของแข็งต่อชั่วโมงที่ใช้ในการพ่น (M_s) ประกอบด้วย $(W_s)_1$ มีหน่วยเป็นน้ำหนักความชื้นต่อน้ำหนักของของแข็ง วัสดุจะถูกทำแห้งได้ของแข็งที่มีความชื้น $(W_s)_2$ มีหน่วยเป็นน้ำหนักความชื้นต่อน้ำหนักของแข็ง วัสดุขณะพ่นมีอุณหภูมิ $(T_s)_1$ ผลิตภัณฑ์ที่ออกมีอุณหภูมิ $(T_s)_2$ อากาศแห้งที่ส่งเข้าไปในภาชนะอบแห้งด้วยอัตรา (G_a) น้ำหนักของอากาศแห้งต่อชั่วโมงที่อุณหภูมิ $(T_a)_1$ ความชื้นสมบูรณ์ขณะเข้ามีค่า (H_1) ความชื้นของอากาศที่ออกจากภาชนะอบแห้ง (H_2) และอุณหภูมิขณะออก $(T_a)_2$

สมดุลความชื้น (moisture balance)

ความชื้นที่เข้ามากับวัสดุ = $M_s(W_s)_1$

ความชื้นที่เข้ามากับอากาศร้อน = $G_a(H_1)$

ความชื้นที่ติดมากับผลิตภัณฑ์ที่ออก = $M_s(W_s)_2$

ความชื้นที่ออกมากับอากาศร้อนออก = $G_a(H_2)$

เนื่องจากเป็นระบบที่ทำงานอย่างต่อเนื่องจึงไม่มีการสะสมผลิตภัณฑ์ในภาชนะอบแห้ง

มวลที่เข้า = มวลที่ออก

$$M_s(W_s)_1 + G_a(H_1) = M_s(W_s)_2 + G_a(H_2)$$

หรือ
$$M_s[(W_s)_1 - (W_s)_2] = G_a(H_2 - H_1) \qquad (3.11)$$

สมดุลความร้อน (heat balance)

เอนทาลปีของอากาศที่เข้าไปภาชนะอบแห้ง = $G_a(Q_a)_1$

เอนทาลปีของวัสดุเหลวที่เข้าภาชนะอบแห้ง = $M_s(Q_s)_1$

เอนทาลปีของอากาศที่ออกจากภาชนะอบแห้ง = $G_a(Q_a)_2$

เอนทาลปีของของแข็งที่แห้ง = $M_s(Q_s)_2$

ความร้อนที่เข้า = ความร้อนที่ออก + ความร้อนที่สูญเสีย

$$G_a(Q_a)_1 + M_s(Q_s)_1 = G_a(Q_a)_2 + M_s(Q_s)_2 + Q_L \qquad (3.12)$$

เมื่อ Q_L = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากภาชนะอบแห้ง

= $UA\Delta T$

สำหรับภาชนะอบแห้งที่มีการหุ้มฉนวนอย่างดี จะมีปริมาณความร้อนที่สูญเสียต่ำ และภาชนะอบแห้งที่ไม่หุ้มฉนวนจะมีปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากภาชนะอบแห้งมาก ฉะนั้น Q_L จะเป็นเทอมที่สำคัญ ค่าเอนทาลปีของวัสดุเหลวเมื่อผ่านเข้าไปในหัวพ่นฝอย จะเท่ากับผลบวกของเอนทาลปีของของแข็งที่แห้งและความชื้นที่เป็นของเหลว ดังนั้น

$$(Q_s)_1 = C_{ds}(\Delta T) + (W_s)_1 C_w \Delta T \qquad (3.13)$$

C_{ds} = ค่าความจุความร้อนของของแข็งที่แห้ง

C_w = ค่าความจุความร้อนของความชื้น (ในรูปของเหลว)

ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของของเหลวกับอุณหภูมิที่อ้างถึง

เอนทาลปีของอากาศแห้ง (Q_a) ที่เข้าหรือออกจากภาชนะอบแห้งสามารถแสดงในเทอมของความร้อนชื้น (humid heat) ความชื้นสมบูรณ์ (absolute humidity) และความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat)

$$Q_a = C_s(\Delta T) + H\lambda \quad (3.14)$$

λ = 597.3 กิโลแคลอรี่ต่อกิโลกรัม ที่ 0 องศาเซลเซียส (760 มิลลิเมตรปรอท)

= (1075.2 บีทียูต่อปอนด์ 32 องศาฟาเรนไฮต์)

3.7.5 การเลือกชนิด การออกแบบ และการดำเนินงานเกี่ยวกับเครื่องทำละอองฝอย

เครื่องทำละอองฝอยทั้งแบบจานหมุนและหัวฉีด จะให้ลักษณะละอองฝอยแตกต่างกัน เครื่องทำฝอยแต่ละชนิดจะมีทั้งข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบในการเลือกชนิดของหัวฉีดของเหลวจะขึ้นกับอนุภาคผงและลักษณะการกระจายของขนาดผงผลิตภัณฑ์ (particle size distribution) ที่ต้องการ โดยทั่วไปการเพิ่มพลังงานในการพ่นฝอยโดยภาวะในการป้อนของเหลวคงที่ จะทำให้ขนาดของหยดหรือละอองของเหลวที่ออกจากวงล้อของหัวฉีดขนาดเล็กลง ดังนั้นการเพิ่มความดันในเครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยแรงดัน หรือการเพิ่มรอบในการหมุนของเครื่องทำละอองฝอยแบบจานหมุน หรือการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและของเหลวในเครื่องทำละอองฝอยแบบหัวฉีดด้วยความดันชนิด 2 ช่องเปิด จะมีผลทำให้ขนาดของผงที่ได้มีขนาดเล็กลงและเป็นผลทำให้ความหนาแน่นปรากฏสูงขึ้นด้วย

ในการเปรียบเทียบเครื่องป้อนของเหลว 2 ชนิด พบว่า เครื่องทำละอองฝอยแบบจานหมุนมีข้อได้เปรียบดังนี้คือ

- สามารถให้กำลังการผลิตสูงโดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนหัวเหวี่ยง
- สามารถใช้กับของเหลวที่มีความกัดกร่อนสูง
- ไม่มีปัญหาจากการอุดตันของของเหลว เพราะช่องไหลออกของของเหลวมีขนาดใหญ่
- เป็นระบบที่ใช้ความดันต่ำ ซึ่งง่ายต่อการป้อนของเหลว
- ขนาดของอนุภาคละอองฝอย สามารถควบคุมได้โดยปรับความเร็วในการหมุนวงล้อ

คุณสมบัติของของเหลว (feed properties) การเพิ่มความหนืดของของเหลวหรือลดอุณหภูมิของของเหลวก่อนเข้าเครื่องจะทำให้ละอองฝอยมีขนาดใหญ่ขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของ

ของเหลวมีผลต่อภาวะการระเหยน้ำ โดยทั่วไปจะมีผลทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น และความหนาแน่นปรากฏต่ำลง

อัตราการป้อนของเหลว (feed rate) เมื่ออัตราการป้อนของเหลวเพิ่มขึ้นในขณะที่ภาวะอื่นคงที่ จะได้อาหารแห้งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

การออกแบบภาชนะอบแห้ง (drying chamber design) สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะพิเศษ เช่น มีลักษณะเป็น thermoplastic หรือ hygroscopic เป็นต้น การออกแบบภาชนะอบแห้งต้องออกแบบอย่างละเอียดและรอบคอบ ผนังของภาชนะอบแห้งจะต้องมีอุณหภูมิต่ำอยู่เสมอ ดังนั้น ผนังด้านในของภาชนะอบแห้งจะต้องมีชั้นของลมเย็นคอยหุ้มรอบๆ หรือต้องใช้ลมเย็น (air bloom) เป่าไปรอบ ๆ ผนังของภาชนะอบแห้ง

อัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) อัตราการไหลของอากาศเป็นตัวควบคุมเวลาที่ของเหลวจะอยู่ในภาชนะอบแห้ง (residence time) การเพิ่มเวลาให้อาหารอยู่ในภาชนะอบแห้งนานขึ้น จะมีผลทำให้การระเหยน้ำมีมากขึ้น การลดความเร็วของอากาศช่วยให้สามารถเก็บรวบรวมผงผลิตภัณฑ์จากภาชนะอบแห้งได้ดี แต่ความสามารถของเครื่องจักรจะลดลง ซึ่งแก้ไขได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของลมเข้าจะทำให้การระเหยน้ำรวดเร็ว แต่ความหนาแน่นปรากฏจะลดลง เพราะผงที่ได้มีความโปร่ง (porosity) มากขึ้น

อุณหภูมิในการทำแห้ง (drying temperature) การเพิ่มอุณหภูมิของลมเข้า โดยที่อัตราการป้อนของเหลวคงที่จะเพิ่มความสามารถในการระเหยน้ำ (evaporative capacity) ทำให้การทำแห้งประหยัดขึ้น เนื่องจากอัตราการระเหยน้ำเร็วขึ้นและผงที่ได้มีความหนาแน่นปรากฏลดลง เนื่องจากมีความโปร่งมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลมออกเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นในผงผลิตภัณฑ์จะลดลง ในการปฏิบัติงานโดยมีอุณหภูมิลมออกต่ำ เพื่อให้ได้ผงที่มีความชื้นสูงนั้น จะมีการทำผงโดย agglomeration อีกขั้นตอนหนึ่ง เพื่อผลิตผงชนิดละลายน้ำ (instant powder) ได้ทันที

3.7.6 ข้อดี ข้อเสีย และปัญหาของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

ข้อได้เปรียบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

- ทำให้แห้งได้ในทันที
- เป็นการทำแห้งแบบต่อเนื่อง
- เครื่องมือไม่ซับซ้อนมากนัก
- ใช้แรงงานต่ำ

ข้อเสียเปรียบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

- มักเกิดความเสียหายของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากความร้อน (heat damage)
- ผงที่ได้ละเอียดเกินไป

การอบแห้งแบบพ่นฝอยแม้จะมีขั้นตอนไม่ยุ่งยากมากนักแต่การออกแบบสำหรับเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในลักษณะเครื่องมือที่มีความซับซ้อนขึ้น อาจก่อให้เกิดปัญหามากมาย นับตั้งแต่การออกแบบเครื่องทำละอองฝอยไปจนถึงการเก็บผงผลิตภัณฑ์ แต่ปัญหาที่เป็นอุปสรรคมากก็คือ

- เครื่องทำละอองฝอยทำให้ขนาดของละอองผลิตภัณฑ์ที่พ่นออกมา มีขนาดต่างกัน ทำให้การทำแห้งเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอ

- อากาศที่เป็นตัวพาความชื้นที่ระเหยออกมาจากผงผลิตภัณฑ์ไม่เร็วพอ ที่จะนำความชื้นนั้นออกไปในทันที ทำให้การทำแห้งเกิดลักษณะไม่สม่ำเสมอ

- เกิดการเสียหายของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากอยู่ในช่วงอากาศร้อนนานเกินไป หรือเกิดการหลอมเหลวละลายของผลิตภัณฑ์ติดกับฝาผนังของภาชนะทำแห้ง

- ความยุ่งยากในการเก็บผง พวกที่มีลักษณะดูดน้ำง่าย ซึ่งผงเหล่านี้มักจะจับตัวเป็นก้อน

แม้ว่าจะมีเครื่องทำละอองฝอยที่ดี แต่การเกิดความเสียหายของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความร้อน (heat damage) ก็ยังคงมีขึ้นอยู่เสมอในอุตสาหกรรมการอบแห้งแบบพ่นฝอย ลักษณะเช่นนี้มักพบในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่เป็นแบบสวนทาง (Co-current) ซึ่งวัตถุดิบและอากาศร้อนจะถูกพ่นเข้าไปทางส่วนบน และผลิตภัณฑ์กับอากาศชื้นจะระบายออกทางด้านล่าง ในช่วงแรกผลิตภัณฑ์ยังจะอยู่ในระดับที่น่าพอใจ เพราะว่าการระเหยน้ำออกไป ทำให้ผงผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก ถึงแม้ว่ารอบๆ จะมีความร้อนอยู่ก็ตาม แต่การระเหยมีลักษณะคงตัวและความชื้นของน้ำที่ระเหยออกมาจะทำให้อากาศในภาชนะอบแห้งเย็นลง ดังนั้นอัตราการทำแห้งจึงลดลง ซึ่งจะก่อให้เกิดลักษณะเช่นนี้เสมอ นอกจากว่าอัตราการป้อนวัตถุดิบและตัวเครื่องทำละอองฝอยจะมีความสมดุลกับปริมาตรและอุณหภูมิของอากาศร้อนที่พ่นเข้าไปในภาชนะอบแห้ง แต่ถ้าไม่สมดุล เช่น ถ้าอัตราการป้อนวัตถุดิบมากเกินไป อากาศในภาชนะอบแห้งจะเย็นลงและชื้นมาก ก่อนจะถึงช่วงทางออกจะเป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูงและจะมีลักษณะเกาะติดผนังของภาชนะอบแห้ง ถ้าอัตราการป้อนวัตถุดิบช้าไป อากาศภายในภาชนะอบแห้งจะร้อนมากและจะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนกับผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมา การแก้ปัญหาที่ยุ่งยากที่เกิดขึ้นในกระบวนการการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นได้ แบ่งขั้นตอนการอบแห้งเป็น 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย

ช่วงที่ 1 ใช้อุณหภูมิสูง 400-600 องศาฟาเรนไฮต์ ช่วงนี้จะใช้เวลาสั้นและอากาศที่ใช้จะมีลักษณะเป็นแบบปั่นป่วน (turbulence) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดลักษณะการทำแห้งแบบฉับพลัน

ช่วงที่ 2 จะมีการให้อากาศอุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 140-200 องศาฟาเรนไฮต์ โดยอากาศที่ใช้จะต้องใช้อากาศที่แห้ง ช่วงนี้จะใช้เวลานานพอสมควร และอัตราการทำแห้งจะเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งจะป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากความร้อนได้

ช่วงที่ 3 อากาศในช่วงนี้จะเป็นอากาศเย็นและมีความชื้นน้อย ทำให้อนุภาคของอา กาศที่ผ่านเข้ามาซึ่งส่วนใหญ่แห้งแล้ว เกิดการแข็งตัวขึ้นป้องกันไม่ให้เกิดลักษณะที่หนืด