บทที่2
วารสารปริทัศน์

2.1การใช้ฟัซซี่ลอจิกในอุตสาหกรรมอาหาร

งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้การควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อไม่นานมานี้ ดังนั้น จึงเป็นเรื่องยากที่จะสรุปรายการที่ครอบคลุมงานวิจัยชิ้นต่างๆเกี่ยวกับฟัซซี่ลอจิกทั้งหมด ซึ่งส่วนมากเป็นงานทางวิศวกรรม จึงทำการเลือกยกตัวอย่างมาแต่งานวิจัยที่เป็นการประยุกต์ใช้กับด้านอุตสาหกรรมอาหาร และโดยเฉพาะเครื่องทำแห้งในอุตสาหกรรมอาหารเท่านั้น เพราะยังมีจำนวนน้อยมาก ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไปนี้

ประเทศแรกที่ใช้ทฤษฎีฟัซซี่ลอจิกในเชิงปฏิบัติ อย่างได้ผล และพัฒนาจนมีความคุ้มค่าในเชิงอุตสาหกรรมได้แก่ประเทศญี่ปุ่น จากนั้นประเทศอุตสาหกรรมอื่นๆหลายๆประเทศทั่วโลกเช่นเกาหลี สหรัฐอเมริกา เยอรมัน นอรเวย์ ฟินแลนด์ และสวิตเซอร์แลนด์ ก็เร่งให้ความสำคัญกับการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ฟัซซี่ลอจิกในประเทศของตนอย่างจริงจังตั้งแต่ปลายทศวรรษ 80 ถึงต้นทศวรรษ 90 เป็นต้นมา(Hall et al.,1994) ส่วนในอุตสาหกรรมอาหารและเทคโนโลยีชีวภาพนั้นการนำฟัซซี่ลอจิกเข้ามาประยุกต์ใช้นับว่าเป็นเรื่องที่ใหม่เมื่อเทียบกับการประยุกต์ใช้ฟัซซี่ลอจิกในอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยในสิ่งตีพิมพ์ทางวิชาการมีรายงานการวิจัยที่ใช้การควบคุมแบบฟัซซีลอจิกสำหรับอุตสาหกรรมอาหารในงานประเภทต่างๆ ดังนี้

ควบคุมการบำบัดน้ำเสียในโรงงาน (Fu,and Poch,1995),(Tong,Beck,and Latten,1980),(Yu,Cao,and Kandel,1990)

ควบคุมกระบวนการหมัก(Konstantinov,and Yoshida,1989),(Nakamura et al.,1985),(Whitnell et. al.,1993),(Numers et. al., 1994),(Zhang et. al., 1994),(Koizumi, 1992),(Oishi et. al., 1991)

ติดตามการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ(Czogala,and Rawlik,1989),(Horiuchi et al.,1993),(Hosobuchi et al.,1993),(Staniskis,and Kildisas,1989)

จำลองการเกิด inversionของซูโครส(Turunen et al.,1985)

ควบคุมกระบวนการอัดให้สุกแบบเกลียว(extrusion process)(Eerikainen,Linko S.,and Linko P.,1988)

จำลองแบบการตัดสินของผู้ทดสอบชิม เกี่ยวกับลักษณะการสุกของเนื้อเสต็ก (Unklesbay et al.,1989)

ควบคุมกระบวนการสกัดน้ำมันดอกทานตะวัน(Popov,1990)

ใช้เป็นระบบผู้เชี่ยวชาญสำหรับการตัดสินกระบวนการหมักเบียร์(Brown et al.,1990)

ใช้พัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์อาหาร และเลือกชนิดของส่วนประกอบ (ingredients) ที่ใช้ ในผลิตภัณฑ์อาหาร (Zhang,and Litchfield,1991)

มีการพัฒนาระบบฟัซซี่ลอจิกเพื่อควบคุมสีของผลิตภัณฑ์อาหารให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยใช้ตัวตรวจวัดสี(sensors)โดยบริษัท Eaton Corp.(Sperber,1991)

ใช้กับกระบวนการฆ่าเชื้อแบบ HTST (High Temperature Short Time)(Shieh,Chen,and Ferng,1992)

การแปรรูปอาหารแบบปราศจากเชื้อ (aseptic processing) (Singh and Ouyang, 1994)

การผลิตอาหารจำพวกของว่าง (snack food) (Landman, 1994),(Choi and Whittaker, 1993)

และ ข้อสรุปวิจารณ์ทั่วไป (Dohnal et. al., 1993)

ในด้านกระบวนการทำแห้งนั้น Zhang และ Litchfield เริ่มพัฒนาต้นแบบการควบคุมเครื่องทำแห้งเมล็ดข้าวโพด ในปี 1990 จากนั้นพัฒนาต่อมาจนถึงงานวิจัยซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก สำหรับเครื่องทำแห้งเมล็ดธัญพืชแบบ continuous crossflow grain dryer (Zhang,and Litchfield,1990,1993) และยังได้มีงานวิจัยต่อมาจนถึงปี 1994 (Zhang and Litchfield, 1994) จากนั้นมีผู้วิจัยคณะอื่นทำวิจัยเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งถั่วลิสง (Martineau, 1995)

2.2 <u>กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายและเครื่องทำแห้งที่ใช้</u>

<u>กระบวนการผลิตน้ำตาลดิบจากอ้อย</u> อาจแบ่งเป็นขั้นตอนพอสังเขปได้ดังนี้

ก.ขั้นการเตรียมอ้อย

อ้อยที่ขนมาทางรถบรรทุกจะถูกนำเข้ารางอ้อยโดยตะกาวลงอ้อยหรือเครื่องมือชนิดอื่นๆที่มีหน้าที่เดียวกัน จากนั้นอ้อยจะไหลเข้ารางหลักและถูกตัดโดยใบมีดซึ่งมีจำนวนและขนาดตามกำลังการผลิตของโรงงาน แล้วฉีกให้เป็นเส้นโดยเครื่องฉีกชิ้นอ้อยให้เป็นเส้นใย(shredder) หรืออาจใช้เครื่อง unigator เพื่อทำหน้าที่ทั้งตัดและฉีกอ้อยในเวลาเดียวกัน ระหว่างนี้อ้อยที่ได้อาจผ่านเครื่องแม่เหล็กเพื่อดูดเศษเหล็กที่อาจติดมาระหว่างขนส่งออกไป

ข.ขั้นการสกัดความหวานหรือการหีบอ้อย

ในการหีบอ้อยอาจใช้ระบบลูกหีบ (mills) หรือใช้ระบบ cane diffusion ขึ้นกับดุลยพินิจของผู้ประกอบการหรือพื้นที่ที่ตั้งโรงงาน แต่โดยทั่วไป ระบบ diffusion มักใช้กับการสกัดความหวานจากหัวบีทรูทมากกว่าจะใช้กับอ้อย สำหรับระบบลูกหีบมักจะมีลูกหีบนำ (crusher rolls) ก่อนจะเป็นชุดลูกหีบจริง(ชนิดสามลูกชุด หรือชนิดห้าลูกชุด) หลายชุดต่อกัน โดยแต่ละชุดมีความกว้างของร่องฟันและช่องระยะห่างระหว่างลูกหีบไม่เท่ากันกับชุดอื่นๆโดยในชุดลูกหีบช่วงปลายของการหีบจะมีร่องฟันตื้นและมีช่องระยะห่างระหว่างลูกหีบแคบกว่าชุดต้นๆ ขณะที่กากอ้อยโผล่ขึ้นมาจากลูกหีบจะมีกระบวนการฉีดพ่นน้ำร้อนหรือน้ำเชื่อมเจือจางที่ได้มาจากลูกหีบชุดถัดไปเพื่อช่วยให้สกัดความหวานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า imbibition หรือ maceration

ค.ขั้นการทำน้ำอ้อยให้บริสุทธิ์

เนื่องจากน้ำอ้อยหรือน้ำเชื่อมที่ได้มีความเป็นกรดสูงและขุ่น จึงต้องทำให้เป็นกลางและนำสิ่งเจือปนต่างๆทั้งที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำออกจากน้ำอ้อย โดยเติมน้ำปูนขาวลงไปพร้อมให้ความร้อนซึ่งจะทำให้เกิดเกลือจำพวก lime salt ซึ่งจะจับเอาสิ่งสกปรกต่างๆออก และเกลือที่เกิดขึ้นเหล่านี้มักเป็นแคลเซียมฟอสเฟต นอกจากนี้การให้ความร้อนจนถึงจุดเดือดของน้ำอ้อยหรือเหนือกว่านั้นเล็กน้อยจะทำให้สิ่งเจือปนจำพวก อัลบูมิน ไขมัน ไข และกัมชนิดต่างๆ จับตัวกันเป็นก้อนซึ่งโครงสร้างของก้อนที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยจับฝุ่นผงและของแข็งที่แขวนลอยอยู่ออกมาด้วยเช่นกัน น้ำอ้อยใสจะถูกส่งไปยังถังบัฟเฟอร์เพื่อส่งไปยังกลุ่มของหม้อต้ม(evaporators)ต่อไป ขณะที่สิ่งต่างๆที่จับตัวกันเหล่านี้ตก

ตะกอนลงมา ซึ่งในขณะนี้เรียกสิ่งสกปรกที่ตกตะกอนลงมาเหล่านี้ว่า mud ซึ่งจะถูกนำไปกรองเอาน้ำเชื่อมที่ปนอยู่ออกมาโดยใช้ vacuum drum filter และ mud ที่กรองเอาน้ำเชื่อมออกแล้วจะนำไปใช้เป็นปุ๋ย ส่วนน้ำเชื่อมที่กรองได้จาก mud จะนำกลับไปหมุนเวียนใหม่ในระบบ

ง.ขั้นการระเหยทำให้เป็นน้ำอ้อยเข้มข้น

น้ำอ้อยดิบที่นำสิ่งเจือปนออกไปแล้วส่วนหนึ่งจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 85% ซึ่งการระเหยจะทำให้สองในสามส่วนของน้ำจำนวนนี้ออกไปจากระบบ การระเหยกระทำโดยกลุ่มของหม้อต้มที่เรียกว่า multiple effect evaporators ที่ต่อกันเป็นอนุกรมโดยหม้อต้มตัวท้ายๆจะมีความดันสุญญากาศต่ำกว่าหม้อแรกๆเพื่อจะได้ต้มน้ำเชื่อมได้ที่อุณหภูมิต่ำลงเพราะไอน้ำที่เป็นไอเสียที่ได้จากหม้อใบแรกๆจะถูกส่งต่อเป็นไอน้ำที่เป็นไอดีของหม้อใบหลังๆเพื่อต้มน้ำเชื่อม ชุดหม้อต้มเหล่านี้มักมีจำนวน 4-5 ใบ (4^{th}-5^{th} effect evaporators) เพราะหากมีจำนวนมากกว่านั้นจะมีประสิทธิภาพต่ำลงทางด้านพลังงานความร้อนที่ใช้ เนื่องจากหม้อต้มเหล่านี้ จากการต้มให้เข้มข้นจะทำให้น้ำเชื่อมที่ได้จากขั้นตอนนี้มีของแข็งอยู่ร้อยละ 65 และมีน้ำอยู่ร้อยละ 35 โดยประมาณ ซึ่งน้ำเชื่อมนี้อาจส่งไปฟอกสีต่อในกระบวนการทำน้ำตาลขาว และน้ำตาลขาวบริสุทธิ์ในอีกขั้นตอนการผลิตหนึ่ง หรือส่งไปดำเนินการขั้นต่อไปในข้อ จ. เพื่อผลิตเป็นน้ำตาลดิบต่อไป

จ.ขั้นการทำน้ำเชื่อมให้บริสุทธ์

กระบวนการขั้นนี้เหมือนกับกระบวนการ phosphatation ในกระบวนการรีไฟน์ทุกประการ กล่าวคือจะเติมปูนขาว และกรดฟอสฟอริกลงไปในน้ำเชื่อม และพ่นฟองอากาศให้ไหลผ่านน้ำเชื่อมพร้อมทั้งเติมสารโพลิเมอร์ที่ช่วยจับสิ่งสกปรกให้เป็นก้อน (flocculant) ลงไป จากนั้นน้ำเชื่อมที่ผ่านการเติมสาร flocculant แล้วจะผ่านเข้าไปในเครื่องพักใส (clearifier) เพื่อนำสิ่งสกปรกออก

ฉ.ขั้นการเคี่ยวให้ตกผลึก

ใช้หม้อเคี่ยวสุญญากาศ (single-effect vacuum pan) ในการต้มเคี่ยวน้ำเชื่อมจนอิ่มตัว มักเลี้ยงความเข้มข้นให้อิ่มตัวอยู่ในช่วง metastable zone เพื่อจะได้เติมผลึกน้ำตาลลงไปล่อผลึกเพื่อให้เป็น nuclei ในสารละลาย แล้วเลี้ยงผลึกจนหม้อเคี่ยวเต็มและผลึกมีขนาดโตได้มาตรฐานตามต้องการทั่วทั้งหม้อ ซึ่งในการเคี่ยวจนได้สภาวะนี้ต้องอาศัยช่างเคี่ยวที่มี

ประสบการณ์เชี่ยวชาญจึงจะได้ผลดี(แต่คาดว่าระบบควบคุมแบบอัตโนมัติแบบระบบผู้เชี่ยวชาญ(expert system) จะมาแทนที่มนุษย์ในงานส่วนนี้ในที่สุด) ของในหม้อที่ประกอบด้วยผลึกและน้ำเชื่อมที่เหลือในสภาพดังกล่าว ขณะนี้จะเรียกรวมว่า massecuite ซึ่งอาจปล่อยลงไปยังหม้อปั่น (centrifuge) เพื่อแยกผลึกน้ำตาลออก หรือปั๊มพ์ส่งไปผสมกับน้ำเชื่อมต่างๆในขั้นตอนอื่นๆต่อไปแล้วแต่การพิจารณาของผู้ควบคุมเครื่อง

ช.ขั้นการปั่นแยก

massecuite ที่ลงมาจากหม้อเคี่ยวจะถูกปั่นแยกโดยหม้อปั่นโดยหม้อปั่นจะประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญคือตัวถังด้านนอก ระบบปั่นเพิ่มและลดความเร็วรอบ ระบบจ่ายน้ำตาลที่ปั่นได้ออกมา และตัวถังทรงกระบอกด้านในที่บุด้วยแผ่นโลหะตาข่ายพรุนที่มีจำนวนรู 400-600 รูต่อตารางนิ้ว และปั่นที่ความเร็วรอบประมาณ 1000-1800 รอบต่อนาที ให้ความเร่งจากแรงเหวี่ยงประมาณ 500-1800 จี และมักจะติดตั้งเป็นชุดโดยเมื่อลดความเร็วในการปั่นของหม้อใดๆก็ตาม มอร์เตอร์ของหม้อที่กำลังลดความเร็วรอบลงจะทำหน้าที่เป็นไดนาโมปั่นไฟจ่ายให้กับมอเตอร์ของหม้ออื่นๆที่กำลังเพิ่มความเร็วรอบเพื่อประหยัดพลังงาน ในปัจจุบัน วงจรของกระบวนการควบคุมการรับ massecuite และการปล่อยสิ่งที่ปั่นออกมาได้จะถูกควบคุมโดยระบบอัตโนมัติทั้งหมด ผลึกที่ได้ในขั้นนี้จะเป็นน้ำตาลชนิดน้ำตาลดิบ

น้ำตาลที่ส่งออกขายยังต่างประเทศมักเป็นน้ำตาลดิบเสียส่วนใหญ่เนื่องจากเหตุผลด้านราคา การขนส่ง และการเก็บรักษา แต่ก็สามารถนำน้ำตาลดิบมาผ่านการรีไฟน์เพื่อผลิตเป็นน้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ได้หากต้องการ โดยสายการผลิตน้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์อาจอยู่ในโรงงานอีกแห่งหรือต่อเนื่องกับการผลิตน้ำตาลดิบเป็นสายการผลิตอยู่ในโรงงานเดียวกันก็ได้ ซึ่งหากอยู่ในโรงงานเดียวกันน้ำเชื่อมอาจถูกนำไปผ่านการฟอกสีอีกครั้งด้วยกระบวนการรีไฟน์

<u>กระบวนการรีไฟน์เพื่อผลิตน้ำตาลขาว และน้ำตาลขาวบริสุทธิ์จากอ้อยหรือน้ำตาลดิบ</u>

กระบวนการรีไฟน์ซึ่งอาจจะทำต่อเนื่องกับการผลิตน้ำตาลดิบหากอยู่ในโรงงานเดียวกันพอจะจำแนกได้เป็นขั้นตอนต่างๆต่อไปนี้

ก.<u>แอฟไฟเนชัน(affination) และการฟอกสี</u>

หากผลิตน้ำตาลขาวจากน้ำตาลดิบที่ขนส่งมาจากที่อื่น หรือจากน้ำตาลดิบที่เก็บเอาไว้จากขั้นตอนการผลิตน้ำตาลดิบ จะต้องนำน้ำตาลดิบนั้นมาฉีดล้างเอาฟิล์มมอลลาสที่เคลือบอยู่บนผิวน้ำตาลดิบออกไปก่อนเพื่อนำสิ่งสกปรกออกไปขั้นหนึ่งก่อนนำไปละลายเป็นน้ำเชื่อม ขั้นตอนการฉีดล้างนี้เรียกว่า affination จากนั้นน้ำเชื่อมที่ละลายได้จะถูก pre treat ด้วยถ่านกัมมันต์ หรือด้วย bone char ก่อนเพื่อเอาสีเจือปนบางส่วนออกก่อนนำไปผ่านกระบวนการฟอกสีให้มีความใสเพิ่มขึ้น เรียกกระบวนการฟอกสีในการรีไฟน์นี้ว่า defecation หรือ clearification ซึ่งประกอบด้วยทั้งกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี

<u>กระบวนการทางกายภาพ</u> การทำ clearification ทางกายภาพคือการกรองโดย pressure filtration แบบ leaf –type filter ชนิดต่างๆ

<u>กระบวนการทางเคมี</u> การทำ clearification ทางเคมีอาจแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆได้สามชนิดคือ sulphitation phosphatation และ carbonation ทั้งนี้ แล้วแต่ผู้ประกอบการจะเลือกใช้ ซึ่งแต่ละชนิดก็ยังสามารถแบ่งออกเป็นชนิดย่อยๆได้อีกหลายชนิดซึ่งมีรายละเอียดมากเกินกว่าจะนำมากล่าวในวารสารปริทัศน์ แต่ปัจจุบันมักไม่นิยมการฟอกสีแบบ sulphitationแล้ว เพราะมีข้อเสียในแง่ของสารเคมีตกค้าง และสีที่จับเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับกำมะถันจะค่อยๆกลับมามีสีเหมือนเดิมซึ่งจะทำให้มีอายุการเก็บสั้น คงเหลือแต่ phosphatation และ carbonation ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งในการผลิตขั้นตอนนี้จะมีตะกอนสารประกอบฟอสเฟตหรือสารประกอบพวกแคลเซียมคาร์บอเนตและเกลือแคลเซียมที่จับเอาสิ่งสกปรกออกจากน้ำเชื่อมเกิดขึ้นตามลำดับขึ้นกับวิธีที่ใช้ว่าจะเป็น phosphatation หรือ carbonation ซึ่งจะต้องกรองออกจากน้ำเชื่อมโดยใช้เครื่องกรองน้ำเชื่อมที่ได้อาจนำไปผ่านคอลัมน์ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนอีกครั้งหนึ่ง อนึ่งปัจจุบันมีกระบวนการที่เพิ่งพัฒนาขึ้นใหม่สำหรับใช้ในการนี้นอกเหนือจากกระบวนการจำพวก phosphatation และ carbonation ต่างๆ กระบวนการใหม่ที่กล่าวนี้เรียกว่า magnesia process (Chen, 1993)

ข.<u>Decolorization</u>

กระบวนการนี้เป็นการฟอกสีที่อาจยังมีอยู่ในน้ำเชื่อมด้วยตัวดูดซับจำพวก carbonaceous adsorbents หรือ synthetic resins โดยเกิดกระบวนการ adsorbtion ในการดูดซับสีเจือปนออกจากน้ำเชื่อม

น้ำเชื่อมที่ได้จะถูกนำไปต้ม เคี่ยว และปั่นเหมือนกับในการผลิตน้ำตาลดิบ เพียงแต่อาจมีการส่งไปผ่านการฟอกสีหลายครั้ง หรือตกผลึกหลายครั้งจนกว่าจะได้ค่าสีตามที่กำหนดไว้ แต่เนื่องจากขณะนี้ผลึกน้ำตาลทรายขาว และ น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ที่ได้ ไม่มีฟิล์มมอลลาสเคลือบอยู่บนผิวอีกต่อไปเหมือนกรณีน้ำตาลดิบ จึงง่ายต่อการเสื่อมสภาพระหว่างเก็บรักษาทั้งจากสาเหตุทางกายภาพ และชีวภาพเพราะง่ายต่อการจับตัวเป็นก้อนและถูกใช้โดยเชื้อจุลินทรีย์ หากมีความชื้นมากเกินไป ดังนั้นในการผลิตน้ำตาลทรายชนิด น้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์จึงต้องมีกระบวนการขั้นสุดท้ายที่จำเป็นมากคือ การทำแห้งน้ำตาลทรายเพื่อควบคุมความชื้นให้อยู่ในช่วงที่กำหนดก่อนส่งเข้าไปเก็บในถังหรือไซโลเสมอ ไม่เหมือนในกรณีของน้ำตาลดิบ ที่แม้จะมีขั้นตอนการทำแห้งเช่นเดียวกัน แต่ก็สามารถเก็บได้ที่ความชื้นสูงกว่า

<u>การทำแห้งและเก็บรักษาน้ำตาลทราย (Sugar drying and conditioning)</u>

น้ำตาลทรายเปียกที่ปล่อยออกมาจากหม้อปั่นสุดท้ายมีความชื้นประมาณ 1% และจะถูกขนไปยังถังจ่ายเหนือเครื่องทำแห้ง(ถ้ามี) โดยสายพานหรือกะพ้อ มีการศึกษาวิจัย(Chen, 1993) พบว่าหากอุณหภูมิในการทำแห้งอยู่ที่ระดับประมาณ 145 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้ผลึกน้ำตาลที่ใสมันวาวและมีลักษณะปรากฏดีเมื่อออกจากเครื่องทำแห้ง แต่หากเก็บหรือเคลื่อนย้ายจะทำให้ผลึกเกิดความขุ่นและแตกเป็นผงได้ ขณะเดียวกัน น้ำตาลที่ทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่านั้นจะไม่เปลี่ยนลักษณะปรากฏระหว่างการเก็บรักษา

ชนิดของเครื่องทำแห้งที่ใช้

เครื่องทำแห้งที่ใช้ในการทำแห้งน้ำตาลมีหลายประเภท ได้แก่

1.Granulator มีลักษณะเป็นถังสองถังต่อกันแบบอนุกรม ถังหนึ่งใช้ทำแห้ง อีกถังหนึ่งใช้ลดอุณหภูมิ เป็นเครื่องทำแห้งแบบเก่าที่ไม่ค่อยนิยมใช้ในปัจจุบัน

2. Roto-Louvre Drier ประกอบด้วยถังทรงกระบอกภายนอกขนาด 6 X 18 ฟุต หรือ 1.8 X 5.4 เมตร เช่นเดียวกับ granulator แบบเก่า แต่มีชั้นภายในทำด้วย louver plate หลายๆแผ่นติดอยู่กับ full-length tapering radial plates ซึ่งหมายความว่าทรงกระบอกภายในอันนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเมื่อใกล้จะถึงปลายด้านที่จ่ายผลิตภัณฑ์แห้ง ช่องว่างระหว่างถังด้านนอกและด้านในจึงแบ่งออกเป็นช่องอากาศร้อนหลายๆช่องและทางที่ออกได้ก็มีเพียงช่องที่อยู่ระหว่างแผ่น louver plate เท่านั้น น้ำตาลเปียกจะป้อนเข้ามาในทรงกระบอกที่อยู่ด้านในด้วยอัตราคงที่ลงไปบน louver plate ขณะที่เครื่องทำแห้งหมุน เบดของน้ำตาลจะตะแคงไปในทิศทางของการหมุนอย่างช้าๆทำให้ตกลงไปบนผิวของโลหะแผ่นถัดๆไปทำให้ไหลเป็นเส้นทางที่บิดเป็นเกลียวไปยังปลายของถังโดยเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องคงที่ช้าๆ อากาศร้อนจะถูกบังคับให้ไหลโดยอัตโนมัติโดยชั้นของถังภายในที่ทำมุมเอียงซึ่งจะทำให้เบดของน้ำตาลบางที่สุดที่ปลายด้านที่ใช้ป้อนน้ำตาลเข้าซึ่งจะค่อยๆหนาขึ้นเมื่อไหลไปข้างหน้า เบดที่บางนี้จะทำให้มีความต้านทานการไหลผ่านของอากาศร้อนน้อยที่สุด ดังนั้นอากาศจำนวนมากที่สุดจะไหลผ่านเบดที่ปลายด้านป้อนเข้า ณ บริเวณที่น้ำตาลมีความชื้นมากที่สุด

3.Fluidized-Bed Drier การทำแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดสำหรับน้ำตาลแห้งมีการนำมาใช้ในประเทศไทยภายหลังจากเครื่องแบบอื่นๆ แต่ในต่างประเทศมีการนำมาใช้ตั้งแต่ทศวรรษที่ 1970 เป็นต้นมา โดยมีการออกแบบในหลายรูปแบบหลายชนิดและในหลายขนาดขึ้นกับกำลังการผลิตที่ต้องการ โดยทั่วไปจะเป่าลมร้อนผ่านฟลูอิไดซ์เบดของน้ำตาลเพื่อระเหยเอาความชื้นส่วนเกินออกไปและอาจใช้หลักการเดียวกันมาทำเครื่องฟลูอิไดซ์เบดส่วนที่ใช้ทำให้น้ำตาลทรายที่แห้งเย็นลงก่อนนำไปเก็บรักษาไว้ในที่บรรจุเพื่อกันการจับตัวเป็นก้อน โดยมีการกล่าวถึงสถาวะการทำแห้งที่ได้จากเครื่องทำแห้งชนิดนี้ไว้ว่า(Chen,1993) การสึกกร่อนของน้ำตาลทรายในฟลูอิไดซ์เบดขณะที่ความเร็วลมขาเข้ามีค่า 1.3 เมตรต่อวินาที จะมีการสึกกร่อน 7% ภายใน 3 ชั่วโมง และเมื่อติดตั้งแผ่นสำหรับเบนทิศทางการไหล(Deflectors) เข้าไป การสึกกร่อนลดลงเป็น 4% และเมื่อลดความเร็วลมเป็น 0.7 เมตรต่อวินาที ไม่ว่าจะมีหรือไม่มีแผ่นกั้น จะได้ค่าการสึกกร่อนเพียง 1% และพบว่าการทำแห้งชนิดนี้จะมีผลดีมากขึ้นถ้าแบ่งการทำแห้งเป็นสองขั้นคือ ขั้นแรกที่ 130-140 เซลเซียส ประมาณ 20-40 วินาที จากนั้นใช้อุณหภูมิ 70-100 เซลเซียส ประมาณ 80-100 วินาที แทนที่จะใช้การทำแห้งแบบปกติของเครื่องทำแห้งระบบนี้ที่ 110 เซลเซียส เป็นเวลา 120-150 วินาที และความชื้นสุดท้าย

ของแบบสองขั้นจะได้เท่ากับ 0.02 – 0.03% เปรียบเทียบกับฟลูอิไดซ์เบดแบบปกติที่จะได้ความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.04 – 0.05% เครื่องทำแห้งชนิดนี้มีข้อดีที่การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและไม่ต้องการการดูแลรักษามากเนื่องจากมีส่วนประกอบที่เคลื่อนไหวเพียงบางส่วนทั้งยังสามารถติดตั้งระบบการเดินเครื่องแบบอัตโนมัติได้อย่างเต็มที่ แต่มีข้อเสียคือเปลืองพลังงานมากที่สุดในระหว่างเครื่องทำแห้งน้ำตาลชนิดต่างๆ

4.Shelf Dryer หรือ Turbo-Tray Dryer เป็นเครื่องทำแห้งที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยตัวถังโลหะทรงกระบอกภายนอกหุ้มด้วยฉนวน มีพัดลมดูดอากาศผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจ่ายเข้าไปในตัวถังด้านข้างของเครื่องทำแห้งซึ่งภายในจะมีชุดพัดลมดูดอากาศร้อนเป่ากระจายให้ทั่วภายในเครื่องทำแห้งซึ่งอากาศร้อนจะไหลแบบ cross flow ผ่านเบดของน้ำตาล ส่วนประกอบภายในเครื่องทำแห้งนั้นประกอบด้วยถาดรับน้ำตาลรูปโดนัทคือเป็นถาดแบนกลมมีช่องกลมตรงกลางจำนวนหลายถาด ถาดเหล่านี้เชื่อมติดกับแกนหมุนรวมตรงกลางที่ตั้งอยู่ในแนวดิ่งทำหน้าที่ยึดถาดรับน้ำตาลทุกถาดเข้าด้วยกันเรียงลำดับขึ้นไปในแนวดิ่ง เมื่อแกนหมุนนี้หมุนจะทำให้ถาดรับน้ำตาลทุกถาดหมุนด้วย น้ำตาลเปียกจะถูกป้อนลงมาบนถาดชั้นบนสุด จากนั้นน้ำตาลจะหมุนไปพร้อมถาดจนพบกับแขนกวาดน้ำตาลทำด้วยโลหะเชื่อมติดตายตัวกับผนังด้านในของตัวถังเครื่องทำแห้ง แขนดังกล่าวจะยื่นสอดเข้ามาในช่องระหว่างถาดน้ำตาลเรียงลงไปทุกระดับความสูงซึ่งจะกวาดเอาน้ำตาลจากถาดแรกไปยังถาดที่สอง จากถาดที่สองน้ำตาลจะถูกกวาดลงไปยังถาดถัดๆไปด้วยวิธีเดียวกันเมื่อแกนหมุนยังคงหมุนต่อไป จนกระทั่งตกถึงยังถาดสุดท้ายด้านล่างในสภาพน้ำตาลแห้งแล้วจึงถูกกวาดตกลงไปยังสายพานลำเลียง กะพ้อ หรือถังเก็บ เพื่อนำไปผ่านกระบวนการ conditioning ต่อไป ข้อดีของระบบนี้คือประหยัดเนื่อที่เพราะติดตั้งในแนวตั้ง มีพื้นที่การระเหยแห้งมาก ใช้พลังงานน้อยกว่าแบบฟลูอิไดซ์เบดมากและมีการสึกกร่อนของผลึกน้ำตาลน้อยมากจึงไม่ต้องมีการติดตั้งระบบ dust collector เหมือนในเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด แต่อาจมีปัญหาในด้านการกระจายความร้อน และการสะสมของน้ำตาลเปียกภายในถาด รวมทั้งค่า time delay และ resident time ที่มีค่านานซึ่งระบบควบคุมแบบวงจรปิดที่ใช้ควบคุมอาจจัดการแก้ไขปัญหาในการควบคุมได้ยากและยากต่อการเก็บข้อมูลเพื่อพยากรณ์การตอบสนองระยะยาวของระบบต่อสิ่งรบกวนอันอาจจะเกิดขึ้น

2.3 การควบคุมเครื่องทำแห้งที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

เครื่องทำแห้งเกือบทุกแบบที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มีระบบควบคุมอัตโนมัติในแบบต่างๆและในหลายระดับติดตั้งไว้เสมอ เครื่องเหล่านี้มีระบบการควบคุมแบบไม่ซับซ้อน เช่น ควบคุมอุณหภูมิของก๊าซขาออก (exhaust gas) สำหรับการทำแห้งโดยตรง การทำแห้งในระดับเล็กหรือการทำแห้งที่มีอัตราการทำแห้งช้าๆ มักจะถูกควบคุมโดยตรงจากผู้ควบคุม

หน่วยการผลิตระดับใหญ่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำแห้งอย่างรวดเร็วหรือหน่วยการผลิตที่ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณภาพระดับสูงจะต้องติดตั้งระบบควบคุมแบบอัตโนมัติบางระดับเอาไว้ แม้ในขณะนี้เครื่องทำแห้งต่างๆ ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะใช้วิธีการควบคุมต่างๆ แต่ที่ใช้กันทั่วไปคือการควบคุมแบบ PID แต่ก็เป็นที่หวังว่าภายในทศวรรษหน้า เครื่องทำแห้งจะใช้ประโยชน์จากการควบคุมแบบใหม่เช่นการควบคุมแบบ model-based control, fuzzy logic control, หรือ neural nets control มากขึ้นเป็นลำดับ เมื่อพบว่าสภาวะการทำงานของเครื่องทำแห้งนั้นมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (highly nonlinear) และพยากรณ์ได้ยากเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ง่ายๆ ที่มีอยู่ ต่อไปนี้จะกล่าวถึงทั้งแนวทางการควบคุมทั่วไปที่ใช้อยู่พร้อมกับแนวทางการควบคุมที่เพิ่งเกิดขึ้นใหม่สำหรับการทำแห้งในอุตสาหกรรมซึ่งจะยกตัวอย่างโดยอ้างถึงเครื่องทำแห้งต่างๆ ที่ใช้งานกันทั่วไป (เช่น spray dryer flash dryer, fluid bed dryer และอื่นๆ)

เป้าหมายของกระบวนการทำแห้งเชิงอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งที่มีปริมาณความชื้นและคุณภาพตามต้องการ โดยใช้ต้นทุนต่ำและได้ผลผลิตมาก เป้าหมายนี้จะบรรลุผลเมื่อสามารถรักษาค่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความชื้นในกระบวนการ และเมื่อสามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากปัจจัยภายนอกไว้ได้ การทำแห้งด้วยความร้อนเป็นกิจกรรมที่ใช้พลังงานมาก ซึ่งอาจใช้พลังงานสูงถึง 15% ของการใช้พลังงานทั้งหมดในอุตสาหกรรม นอกจากนั้นเครื่องทำแห้งทั่วไปมักจะปฏิบัติงานโดยมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ที่ 25% กับ 50% หรืออาจต่ำเพียง 10% การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติกับเครื่องทำแห้งในอุตสาหกรรมจึงให้โอกาสที่จะพัฒนาการเดินเครื่องและประสิทธิภาพของเครื่องทำแห้งให้ดีขึ้นโดยเข้ามาช่วยปรับประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้เหมาะสม การควบคุมเครื่องทำแห้งแบบต่างๆไม่ได้มีความก้าวหน้าทันกับการปรับปรุงกระบวนการทำแห้งและการออกแบบเครื่องทำแห้ง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นผลเนื่องจากปัจจัยหลายประการ (1) เป็นต้นว่า

- การไม่เน้นความสำคัญในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในอดีต
- การขาดความรู้อย่างเห็นได้ชัดเกี่ยวกับบทบาทของการควบคุมเครื่องทำแห้งที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพในการทำแห้ง

- การขาดแคลนวิธีการที่วางใจได้แน่นอนที่จะใช้ตรวจจับความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้โดยตรง
- ความซับซ้อนและความสัมพันธ์เชิงพลวัตที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการทำแห้งต่างๆ ทำให้การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความถูกต้องให้ผลตรงความต้องการ กระทำได้ยาก

เป้าหมายขั้นพื้นฐานของระบบควบคุมเครื่องทำแห้งคือเพื่อ

- รักษาคุณภาพที่ต้องการของผลิตภัณฑ์แห้ง ไม่ว่าจะมีสิ่งรบกวนต่างๆ เกิดขึ้นในการดำเนินการทำแห้ง หรือการแปรผันของวัตถุดิบที่ป้อนเข้ามา
- ทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพมากที่สุดโดยมีการใช้พลังงานที่เหมาะสมที่สุด และค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด
- หลีกเลี่ยงการทำแห้งที่มากหรือน้อยเกินไป การทำแห้งน้อยเกินไปอาจส่งผลให้มีความเสื่อมเสีย (spoilage) ในกรณีของเมล็ดพืชหรือผลิตภัณฑ์อาหารได้ ส่วนการทำแห้งที่มากเกินไป จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน และทำให้ผลผลิตลดลง เพราะราคาของผลิตภัณฑ์บางชนิดขึ้นกับค่า specific moisture content และอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ ที่ไวต่อความร้อนเกิดความเสียหายได้
- ลดผลิตภัณฑ์ที่มีตำหนิ ลดความเสี่ยงต่ออัคคีภัย และการปลดปล่อยของเสียออกสู่บรรยากาศ
- ลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอก
- รักษากระบวนการทำแห้งให้เสถียร
- รักษาประสิทธิภาพของกระบวนการทำแห้งให้ดีที่สุด

หากพิจารณากรณีที่เป็นกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง (batch) การทำแห้งเป็นกระบวนการที่สามารถปรับตัวเอง (self regulate)ได้อยู่แล้ว ซึ่งจะไม่ต้องการระบบการควบคุม ตราบใดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆ ลงๆ (fluctuation) ของอินพุทและไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสมดุลมวลและเงื่อนไขต่างๆ ของกระบวนการ อย่างไรก็ตามตามความเป็นจริงแล้วมีกระบวนการทำแห้งน้อยมากที่จะมีเงื่อนไขเป็นดังที่กล่าวไว้เบื้องต้น เพราะการผลิตมักเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง และมักจะมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เกิดขึ้นเสมอ จึงสมควรที่จะต้องมีการควบคุมให้เป็นระเบียบ เนื่องจากเครื่องทำแห้งเป็นตัวแทนของกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนสำหรับการควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งมีพารามิเตอร์จำนวนมากที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การกำหนดระบบควบคุมสำหรับเครื่องทำแห้งต้องพิจารณาปัจจัยเกี่ยวกับกระบวนการหลายอย่าง

การพิจารณาดังกล่าวได้แก่ ในเรื่องของพลวัตของกระบวนการ จำนวนตัวแปรในกระบวนการที่ต้องสังเกตหรือควบคุม การจัดการกับผลิตภัณฑ์ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเดินเครื่อง ความดัน ความชื้น อัตราการไหลของอากาศและผลิตภัณฑ์ ความชื้นตั้งต้นและความชื้นขั้นสุดท้าย และ ปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ การป้องกันพารามิเตอร์วิกฤติต่างๆ โดยใช้ interlocks ระบบการรับข้อมูล ความยากง่ายในการปรับแต่งการควบคุมและอุปกรณ์ตรวจวัด ความยากง่ายในการดูแลรักษา และความเชื่อใจได้ของระบบ

ความน่าเชื่อถือและราคาระบบควบคุมโดยรวมมีความสำคัญต่อการเลือกใช้ระบบ ถ้าระบบมีความน่าเชื่อถือต่ำ มีราคาสูงย่อมไม่เป็นที่ต้องการของผู้ใช้ เพราะนอกจากจะเสียค่าใช้จ่ายมากแล้ว ยังไม่ส่งผลดีให้กับการดำเนินกระบวนการด้วย

2.3.1 ลักษณะต่างๆ ของระบบควบคุมเครื่องทำแห้ง

สมบัติและเกณฑ์ความต้องการต่างๆ ของระบบควบคุมเครื่องทำแห้งเชิงอุตสาหกรรมใดๆ ได้แก่ (Marchant, 1985)

2.3.1.1. ความแม่นยำ (accuracy) ความชื้นของผลิตภัณฑ์ขาออกจะต้องตรงกับค่าที่ต้องการ

2.3.1.2. เสถียรภาพ (stability) ระบบจะต้องไม่ "แกว่ง" แบบไร้ขอบเขตมิฉะนั้นความชื้นขาออกจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง (fluctuation) อย่างมาก ตัวแปรควบคุมจะต้องปรับเข้าไปสู่ค่าที่ต้องการ

2.3.1.3. ความเร็วในการตอบสนอง (speed of response) สิ่งรบกวนใดๆ (เช่น การเปลี่ยนแปลงในความชื้นขาเข้า) จะต้องถูกชดเชยโดยเร็วด้วยเครื่องควบคุม เพื่อให้มีเวลาการปรับตัวและเวลาปรับเข้าเสถียรของระบบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

2.3.1.4. ความมั่นคง (robustness) ระบบควบคุมจะต้องปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดีแม้ภายใต้สภาวะของความคลาดเคลื่อนตัวค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อการควบคุมสภาวะต่างๆ ของระบบในบริเวณกว้าง

2.3.2 ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการทำแห้ง

ในภาษาของการควบคุมกระบวนการ ตัวแปรต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องอยู่กับกระบวนการทำแห้งเชิงอุตสาหกรรม โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม

ก. ตัวแปรขาเข้า (input variables) ได้แก่ตัวแปรที่ส่งผลกระทบของสิ่งแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทำแห้ง

ข. ตัวแปรขาออกหรือตัวแปรที่ถูกควบคุม (output or controlled variables) ได้แก่ตัวแปรที่ส่งผลกระทบของกระบวนการทำแห้งต่อสิ่งแวดล้อม

ตัวแปรขาเข้า จำแนกเป็นตัวแปรที่ผู้ควบคุมสามารถปรับค่าได้ (manipulated variables) และสิ่งรบกวนหรือตัวแปรที่เป็นภาระให้กับระบบ (disturbances or load variables)

2.3.2.1 ตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ (manipulated variables) ถูกปรับแต่งได้โดยการปรับแต่งค่าโดยระบบควบคุมอัตโนมัติหรือโดยผู้ควบคุมกระบวนการ ตัวแปรขาเข้าที่ปรับค่าได้ที่มีความสำคัญต่อเครื่องทำแห้งได้แก่

2.3.2.1.1.อัตราการให้ความร้อน (เช่น อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า กรณีเครื่องทำแห้งโดยตรง)

2.3.2.1.2.อัตราการป้อนนำเข้าเครื่อง (solid feed rate)

2.3.2.1.3.อัตราการป้อนของอากาศเข้าเครื่อง (สำหรับเครื่องทำแห้งโดยตรง)

2.3.2.1.4.อัตราการหมุน (สำหรับเครื่องแบบ rotary dryer)

2.3.2.2 สิ่งรบกวนหรือตัวแปรที่เป็นภาระให้กับระบบ (disturbances or load variables) ตัวแปรที่ไม่สามารถถูกปรับค่าได้โดยระบบควบคุม ซึ่งตัวแปรที่ถือเป็นสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นกับเครื่องทำแห้งโดยทั่วไปมีดังนี้

2.3.2.2.1.อุณหภูมิของบรรยากาศภายนอก (Ambient air temperature)

2.3.2.2.2.ความชื้นของบรรยากาศภายนอก (Ambient air humidity)

2.3.2.2.3.ระดับความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อนให้กับเครื่อง (Feed moisture content)

2.3.2.2.4.ส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนให้กับเครื่อง (Feed composition)

2.3.2.3 ตัวแปรขาออกหรือตัวแปรที่จะควบคุม (output or controlled variables) อาจจำแนกเป็นตัวแปรขาออกต่างๆ ที่ถูกตรวจวัดได้และที่ไม่ถูกตรวจวัด (หรือยากแก่การตรวจวัด) ซึ่งตัวแปรขาออกต่างๆ ของเครื่องทำแห้ง ได้แก่

2.3.2.3.1. ระดับความชื้นของผลิตภัณฑ์แห้งขาออก (dried product moisture content)

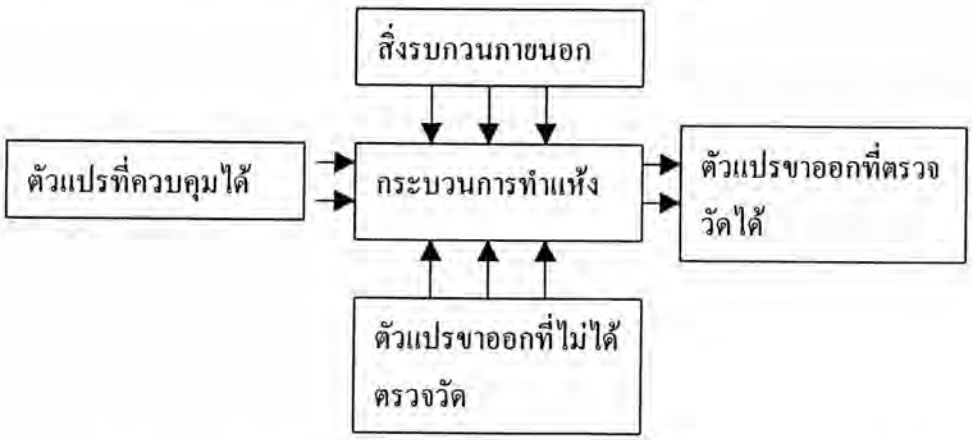
2.3.2.3.2. อุณหภูมิของอากาศขาออกจากเครื่องทำแห้ง (exhaust air temperature)

2.3.2.3.3. ความชื้นของอากาศขาออกจากเครื่องทำแห้ง (exhaust air humidity)

2.3.2.3.4. คุณภาพของผลิตภัณฑ์ (สี, กลิ่น และอื่นๆ)

โดยทั่วไปยากที่จะทำการตรวจวัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์แบบ on-line จากสายการผลิต โดยเหตุนี้ จึงมักถูกสรุปจากการใช้ประสบการณ์ของผู้ควบคุมกระบวนการ ค่าระดับความชื้นสามารถเป็นตัวแปรที่ตรวจวัดได้ โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นที่เหมาะสมในกระบวนการ ในโรงงานอุตสาหกรรมอบแห้งหลายโรงงานจะไม่มีอุปกรณ์วัดค่าดังกล่าว เพราะมีราคาแพง และ/หรืออุปกรณ์วัดยังขาดความน่าเชื่อถือ ดังนั้นในกรณีดังกล่าวค่าความชื้นก็จะเป็นตัวแปรขาออกที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาออก ตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ และตัวแปรที่เป็นสิ่งรบกวนต่างๆ ทำให้เกิดระบบควบคุมสำหรับเครื่องทำแห้ง (ดูรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาออก ตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ และตัวแปรที่เป็นสิ่งรบกวนต่างๆ

ถ้าจะกล่าวในรายละเอียดแล้ววัตถุประสงค์ของระบบควบคุมเครื่องทำแห้งก็เพื่อจะทำให้ได้ค่าตัวแปรขาออกที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้เพื่อทดแทนหรือชดเชยให้กับผลจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เป็นสิ่งรบกวนหลักๆ ตัวแปรขาเข้าจะอยู่ในรูปของคำสั่งต่างๆ ที่คาดการณ์ว่าจะมีผลกระทบต่อกระบวนการ และสิ่งรบกวนที่การควบคุมแบบอัตโนมัติต้องการจะทำให้มีค่าน้อยลงให้มากที่สุด

ตัวแปรขาออกของกระบวนการทำแห้งที่เป็นตัวแปรที่ต้องการควบคุมคือ ระดับความชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่ค่านี้ยากที่จะวัดได้โดยตรง ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์แห้งขาออกจึงมักจะถูกอ้างอิงอยู่กับค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศขาออกจากเครื่องทำแห้ง (exhaust gas) นอกจากนี้เนื่องจากว่าการวัดอุณหภูมิของอากาศขาออกจากเครื่องทำแห้งกระทำได้ง่าย แม่นยำ ค่าเชื่อถือได้ ราคาถูก และมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการทำแห้ง ผู้ผลิตเครื่องทำแห้งจึงใช้ตัวแปรนี้เป็นตัวแปรควบคุมขาออก ซึ่งในความเป็นจริงเครื่องทำแห้งที่มีอยู่ส่วนใหญ่ก็จะใช้การควบคุม

อัตโนมัติที่ยึดตัวแปรตัวนี้เป็นหลัก อย่างไรก็ตามเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าน้อย การใช้การควบคุมทางอ้อม (ด้วยพารามิเตอร์ เช่น อุณหภูมิและความชื้น) นี้ จึงมักส่งผลให้การควบคุมกระบวนการทำแห้งกระทำได้ไม่ดีนัก ในบางกรณีนั้นประเด็นนี้อาจนำไปสู่ความล้มเหลวอย่างร้ายแรงได้ ถ้าใช้ค่าอุณหภูมิของอากาศขาออกจากเครื่องทำแห้งเดี่ยวๆ โดยไม่ได้วัดค่าความชื้นไปพร้อมๆ กัน

ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิที่สูงขึ้นของอากาศขาออกจากเครื่อง อาจถูกมองว่าความจุของเครื่องมีมากขึ้น ทำให้เครื่องควบคุมส่งอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าไปมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากสาเหตุอื่นๆ ซึ่งการสั่งการของเครื่องควบคุมอาจทำให้สถานภาพของปัญหาแย่ลงอีกก็เป็นได้

การควบคุมโดยตรงและการวัดค่าระดับความชื้นของของแข็งโดยวิธี on-line จะทำให้เกิดการปรับปรุงการควบคุมเครื่องทำแห้งขึ้นได้อย่างชัดเจน โดยทำให้มีการวัดค่าระดับความชื้นได้โดยทันทีที่ทางออกของเครื่องทำแห้ง และทำให้มีการชดเชยผลจากปัจจัยต่างๆ ที่รบกวนกระบวนการที่ต้องการควบคุมได้โดยอัตโนมัติ

2.3.3 <u>ระบบควบคุมเครื่องทำแห้งแบบทั่วไปและระบบควบคุมชั้นสูง</u>

2.3.3.1.<u>ระบบควบคุมโดยผู้คุมเครื่อง</u> (manual control)

ระบบนี้อาศัยการตัดสินใจของผู้ควบคุมเครื่องในการตัดสินจุดสิ้นสุดของกระบวนการ แนวทางการควบคุมด้วยมนุษย์อาจจำแนกขั้นตอนเป็นลำดับได้ดังนี้

2.3.3.1.1. เปิดเครื่องทำแห้ง

2.3.3.1.2. ตั้งค่า Throughput ในเบื้องต้น

2.3.3.1.3. วัดค่าความชื้นขาออกและเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่ต้องการ

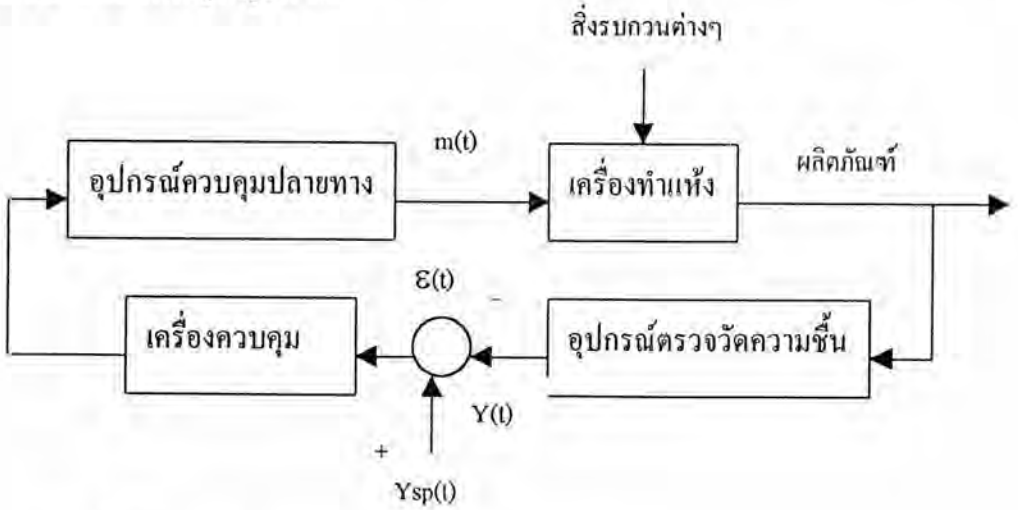
2.3.3.1.4. ปรับค่าตัวแปรต่างๆ ที่สามารถปรับได้โดยอ้างอิงกับค่าความแตกต่างของระดับความชื้นที่วัดได้กับระดับความชื้นที่ต้องการ (ตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ (manipulated variables) เหล่านี้ เช่น การให้พลังงานเข้าไปในระบบ และอัตราการป้อนวัตถุดิบ) เพื่อรักษาระดับความชื้นที่ต้องการเอาไว้

วิธีนี้ง่าย ราคาถูก ไม่ซับซ้อนและคนที่ไม่มีความรู้และประสบการณ์ก็สามารถทำได้ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับโรงงานขนาดย่อมและมักจะเป็นระบบที่มีลักษณะการปฏิบัติงานเป็นครั้ง (batch system) เป็นหลัก แต่จะไม่เหมาะกับกระบวนการทำแห้งขนาดใหญ่ที่ต้องการการควบคุมที่กระชับเพื่อรักษาค่าของตัวแปรขาออกของกระบวนการให้คงที่

2.3.3.2. <u>ระบบการควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับ</u> (Feedback control)

หลักการของการควบคุมแบบป้อนกลับเป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมที่ใช้กันมากที่สุด ในการควบคุมเครื่องทำแห้ง หน้าที่ใหญ่ๆ ของเครื่องควบคุมเครื่องทำแห้งแบบป้อนกลับคือใช้สำหรับคงค่าตัวแปรที่ถูกควบคุมเอาไว้ ณ ค่าที่เป็นเป้าหมายหรือ set point ระบบควบคุมรับสัญญาณที่ตรวจวัดได้ของตัวแปรขาออกที่ถูกควบคุม (เช่น ระดับความชื้น) และเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย set point ซึ่งจะส่งสัญญาณความคลาดเคลื่อนให้กับเครื่องควบคุมหลัก เครื่องควบคุมจะสั่งการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ (manipulated variable) เพื่อลดหรือชดเชยการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการแล้วโดยสั่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมปลายทาง(final control element) อันได้แก่ control valve, มอเตอร์, พัดลม หรือเครื่องทำความร้อน (heater) ขึ้นกับประเภทของกระบวนการ

ตามทฤษฎีแล้วการควบคุมแบบนี้จะให้ผลการปรับแก้ที่ถูกต้องสมบูรณ์สำหรับตัวแปรขาออกของกระบวนการ โดยบังคับให้ค่าตัวแปรนี้กลับเข้ามายังค่าเป้าหมาย (set point) ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

มีคำสั่งการควบคุมแบบป้อนกลับพื้นฐานที่นิยมใช้อยู่สามแบบ คือ proportional, integral และ derivative คำสั่งการแบบ proportional จะบังคับตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้โดยเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณความคลาดเคลื่อน ส่วนคำสั่งการควบคุมแบบ integral จะลบล้างความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่ยังคงเหลือที่ steadystate หรือที่เรียกว่าค่า offset ให้หมดไป และวัตถุประสงค์ของคำสั่งการควบคุมแบบ derivative คือปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับค่าได้โดยพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นขณะนั้น

ในการประยุกต์ใช้การควบคุมกับเครื่องทำแห้งในอุตสาหกรรม ลักษณะการสั่งการควบคุมที่กล่าวไว้เบื้องต้น อาจใช้แยกกัน หรือใช้ร่วมกันเป็น proportional (P) controller, proportional - integral (PI) controller หรือ proportioral-integral-derivative (PID) controller ก็ได้ อย่างไรก็ตามคำสั่งการในลักษณะ derivative มักไม่ค่อยเป็นที่นิยมนัก เนื่องจากจะมีสัญญาณรบกวนมาก (Luyben, 1990, Keey, 1992)

เครื่องควบคุม PID โดยทั่วไปที่มีคำสั่งการ 3 ลักษณะอยู่ในเครื่องเดียวกัน สามารถอธิบายได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$$m(t) = K_c\varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_i}\int \varepsilon(t)dt + K_c\tau_d\frac{d\varepsilon}{dt} + BIAS \text{----------} (2.1)$$

เมื่อ m = คำสั่งการควบคุมซึ่งส่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมปลายทาง

Kc = proportional gain ของเครื่องควบคุม

ε = สัญญาณความคลาดเคลื่อน

τ_i = integral time constant

τ_d = derivative time constant

BIAS = สัญญาณไบแอสของเครื่องควบคุม (สัญญาณที่เกิดขึ้นขณะ $\varepsilon = 0$)

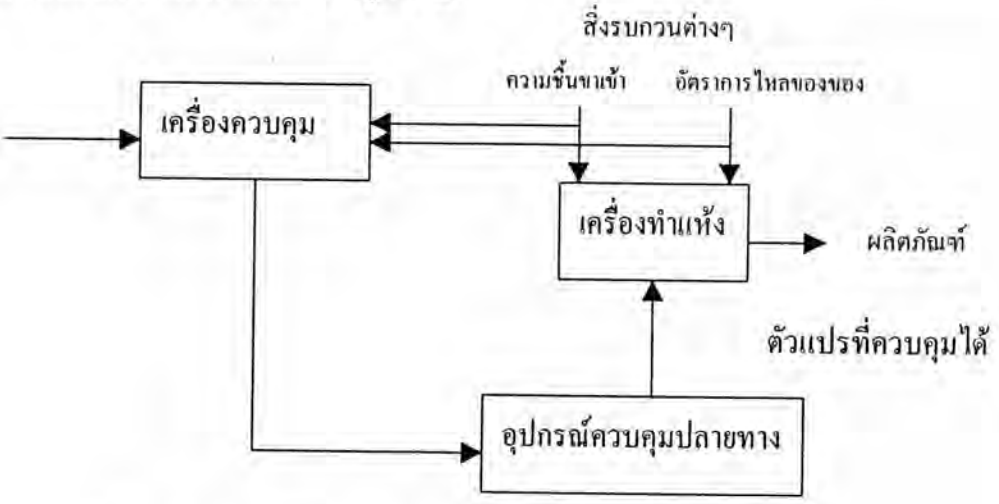
การประยุกต์ใช้เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับในเครื่องทำแห้งได้เคยมีการศึกษามาแล้ว โดย Robinson (Robinson, 1992), Marchant (Marchant, 1985) และ Whitfield (Whitfield, 1986)

2.3.3.3. <u>การควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้า</u> (Feedforward Control)

ระยะเวลาที่วัสดุของแข็งเคลื่อนที่อยู่ในเครื่องทำแห้ง (residence time) อาจค่อนข้างยาวโดยเฉพาะสำหรับเครื่องทำแห้งบางประเภท (เช่น rotary dryers) อัตราการการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างช้า เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ทำแห้ง ในกรณีต่างๆ ดังกล่าว จึงมีการตอบสนองที่ล่าช้า (Time lag) เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงต่างๆของตัวแปรขาเข้ากับผลกระทบต่อตัวแปรขาออก ถ้าค่าการตอบสนองที่ล่าช้านี้มีค่ามาก จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องทำแห้งแบบป้อนกลับลดลง เพื่อเอาชนะปัญหานี้ จึงต้องมีเครื่องควบคุมแบบ Feedforward Control ที่มีความสามารถในการพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าได้ขึ้นมาใช้

ในเครื่องควบคุมลักษณะนี้สิ่งรบกวนต่างๆต่อระบบจะถูกวัด และเครื่องควบคุมจะคำนวณค่าชดเชยการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นสำหรับสิ่งรบกวนเหล่านั้นโดยไม่รอให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในตัวแปรขาออกก่อนแล้วจึงค่อยมาปรับแก้

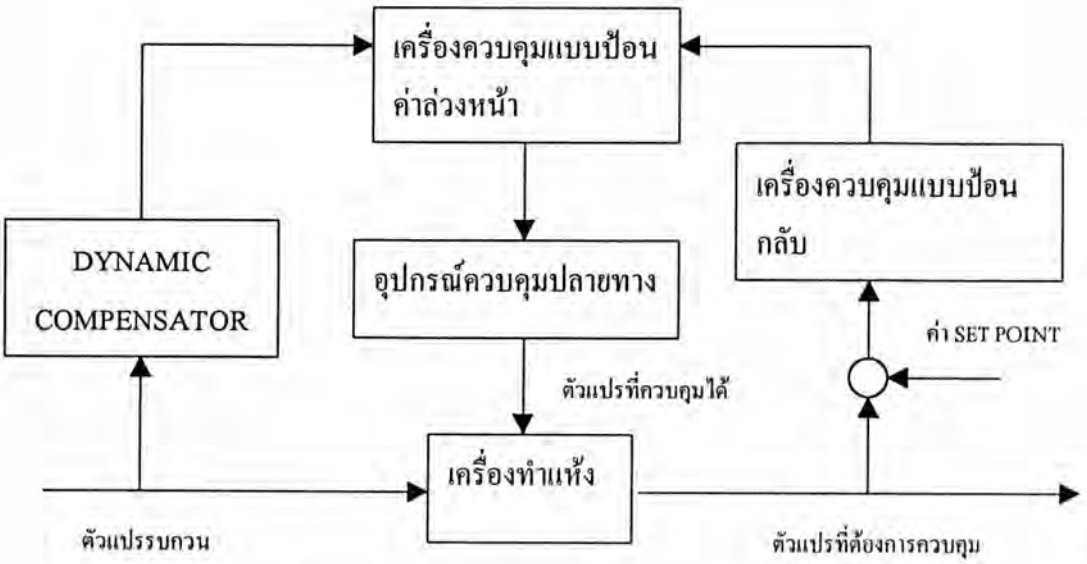
แนวทางการควบคุมทำโดยการวัดค่ารบกวนหรือ load input (เช่น ระดับความชื้นขาเข้า) แล้วเครื่องควบคุมจะใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการเพื่อตัดสินความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งรบกวน ตัวแปรที่สามารถปรับได้ รวมทั้งตัวแปรที่ถูกควบคุมต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะรักษาค่าของตัวแปรขาออกที่ต้องการควบคุมไว้ที่ระดับที่ต้องการโดยลบล้างผลกระทบอันเนื่องจากสิ่งรบกวนอาจมีต่อค่าขาออก ระบบควบคุมแบบนี้จะใช้ได้ผลมากน้อยเท่าไรขึ้นกับความแม่นยำในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการในการทำนายผลการตอบสนองของกระบวนการต่อตัวแปรขาเข้า และการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของตัวแปรรบกวน หลักการของเครื่องควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้าแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการของเครื่องควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้า

2.3.3.4 <u>การควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้า-ป้อนกลับ</u> (Feedforward-Feedback Control)

จากข้อดีและข้อด้อยของการควบคุมทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมา (ดังสรุปไว้ในตารางข้างล่าง) จึงมีแนวคิดในการรวมการทำงานของเครื่องควบคุมทั้งสองแบบเข้าเป็นระบบเดียวกัน



รูปที่ 2.4 เครื่องควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้าร่วมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ

รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบหลักๆ ของระบบนี้ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้าร่วมกับแบบจำลองคณิตสาสตร์ของกระบวนการ เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ และตัวชดเชยเชิงพลวัตทำหน้าที่ของระบบป้อนกลับในการควบคุมแบบนี้คือการปรับแก้ค่าที่เกิดจากผลกระทบของการสั่งการของเครื่องควบคุมแบบ Feedforward ให้ถูกต้องในกรณีที่ขาดความแม่นยำในการวัดและการสร้างแบบจำลองของระบบ

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของระบบควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้า และแบบป้อนกลับ

ข้อดี	ข้อเสีย
Feedforward controller	
1. กระทำการควบคุมล่วงหน้าก่อนผลกระทบจากสิ่งรบกวนจะเกิดมีขึ้นกับระบบ	1. ต้องการรายละเอียดบ่งชี้ถึงสิ่งรบกวนต่างๆ ที่เป็นไปได้ทั้งหมด และต้องทำการวัดค่าสิ่งรบกวนต่างๆ เหล่านั้นโดยตรง
2. ดีสำหรับใช้กับระบบที่การตอบสนองช้า หรือมีค่า dead time นานๆ	2. ไม่สามารถจัดการกับสิ่งรบกวนต่างๆ ที่ไม่ถูกตรวจวัดได้
3. ไม่ทำให้เกิดความไม่เสถียรเหมือนกับในการตอบสนองแบบวงจรปิด	3. ไวต่อการแปรปรวนต่างๆ ของพารามิเตอร์ในกระบวนการ
	4. ต้องการแบบจำลองของกระบวนการที่มีคุณภาพสูง
Feedback controller	
1. ไม่ต้องการ การระบุและวัดค่าสิ่งรบกวนต่างๆ	1. ต้องรอจนเกิดผลกระทบจากสิ่งรบกวนก่อนแล้วจึงค่อยส่งคำสั่งการควบคุมออกไป
2. ไม่ไวต่อความไม่แน่นอนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการ	2. ผลการควบคุมจะไม่น่าพอใจถ้านำไปควบคุมระบบที่มีการตอบสนองช้าหรือมีค่า dead time มาก
3. ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ	3. อาจก่อให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพขึ้นได้ในการตอบสนองแบบวงจรปิด

2.3.3.5. <u>การควบคุมที่ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบ</u> (Model - Based Control, MBC)

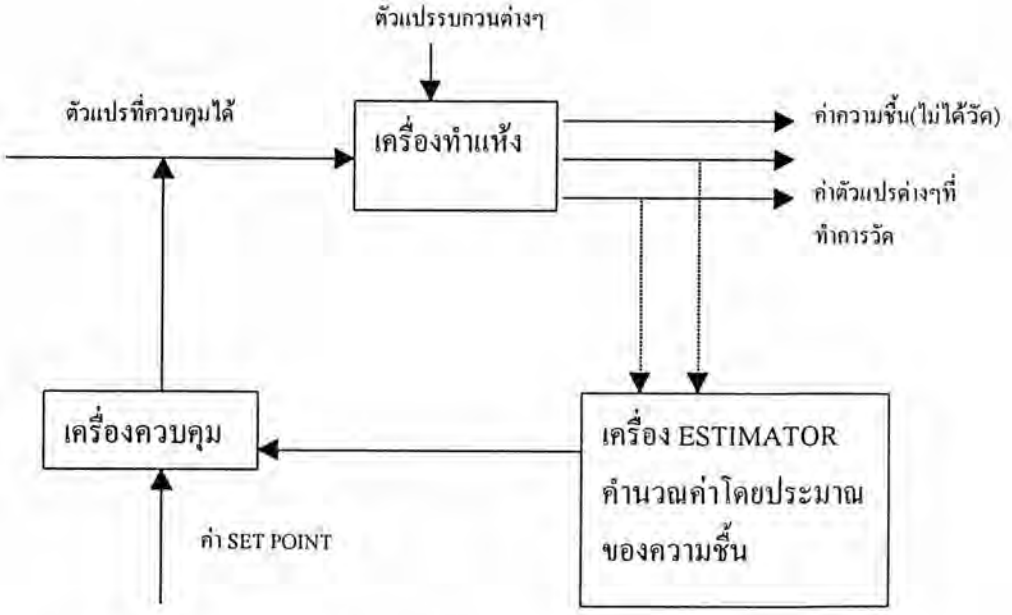
การควบคุมแบบอิงแบบจำลองคณิตศาสตร์ (MBC) เป็นแนวทางการควบคุมกระบวนการที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน แนวคิดนี้ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของกระบวนการเพื่อช่วยในการควบคุม ซึ่งสามารถหารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง (Luyben, 1990),(Garcia and Morari,1982),(Prett and Garcia, 1988),(Morari and Zafiriou, 1988),(Boseley et al, 1992) แนวทางการควบคุมแบบ model-based บางแนวทางได้แก่

2.3.3.5.1. Inferential control

2.3.3.5.2. Internal model control (IMC)

2.3.3.5.3. Dynamic matrix control (DMC)

2.3.3.5.1. ระบบ Inferential control (Stephanopoulis, 1984),(Boseley, 1992), (Roffel, 1987) เป็นแนวทางการควบคุมแบบ MBC ระยะเริ่มแรกสำหรับงานด้านการควบคุมกระบวนการ วิธีการควบคุมแบบนี้จะใช้ได้ผลเมื่อตัวแปรที่ถูกควบคุมของเครื่องทำแห้งตัวหลักๆ (เช่น ระดับความชื้นของผลิตภัณฑ์) ไม่สามารถถูกตรวจวัดได้โดยตรง เนื่องจากความขัดข้องทางเทคนิคบางประการ หรือเนื่องจากไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในการวัดค่า วิธีนี้จะใช้ค่าตัวแปรขาออกที่วัดได้ (เช่น อุณหภูมิของก๊าซหรือผลิตภัณฑ์ และ/หรือ ความชื้น) ร่วมกันกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการเพื่อการประมาณค่าตัวแปรควบคุมที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด ใช้ค่าที่ประมาณได้นี้เพื่อการตัดสินใจของเครื่องควบคุมในการปรับค่าตัวแปรที่สามารถปรับได้ (manipulated variable) เพื่อรักษาค่าตัวแปรขาออกเอาไว้ ณ ค่าที่ต้องการ (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 ระบบ Inferential Control

หลักการควบคุมนี้ยังสามารถใช้เพื่อขัดขวางผลอันเกิดจากสิ่งรบกวนต่างๆ เนื่องจากมีราคาถูกกว่าที่จะประมวลผลสิ่งรบกวนเหล่านี้ขึ้นจากค่าการวัดอื่นๆ ของกระบวนการที่มีอยู่ โดยไม่วัดสิ่งต่างๆ เหล่านั้นโดยตรง โดยการลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆเพิ่มเติม

2.3.3.5.2. Internal model control (IMC) คือการใช้แบบจำลองของกระบวนการและสร้างความสัมพันธ์ของค่ากำหนดต่างๆของเครื่องควบคุม (controller setting) ต่างๆ กับพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองในลักษณะที่จะทำให้การเลือกการตอบสนองใน closed-loop บางอันจะให้ผลเหมือนเป็นเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ(Luyben, 1990), (Boseley,1992) ข้อได้เปรียบของ IMC คือสามารถปรับแต่งเพื่อสมดุลค่า controller performance ด้วยความมั่นคงในการควบคุม ขณะยังคงมีทั้งค่าความคลาดเคลื่อนจากการสร้างแบบจำลองกระบวนการ และการเปลี่ยนแปลงในพลวัตของกระบวนการอยู่ เป็นที่ชัดเจนว่า IMC จะได้ผลเพียงใดขึ้นกับที่ว่าจะมีแบบจำลองที่ใช้การได้ของเครื่องทำแห้งหรือไม่

2.3.3.5.3. Dynamic matrix control (DMC) ใช้วิธีคำนวณแบบ least-squares โดยตรงในการหาค่าที่เหมาะสมของการเปลี่ยนแปลงในอนาคตของตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ เพื่อให้เหมาะกับผลตอบสนองขาออกในอนาคต ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีประสิทธิภาพ (performance index) ถูกทำให้มีค่าลดน้อยลงที่สุด (Luyben, 1990)

2.3.3.6. การควบคุมที่ใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor-Based Control)

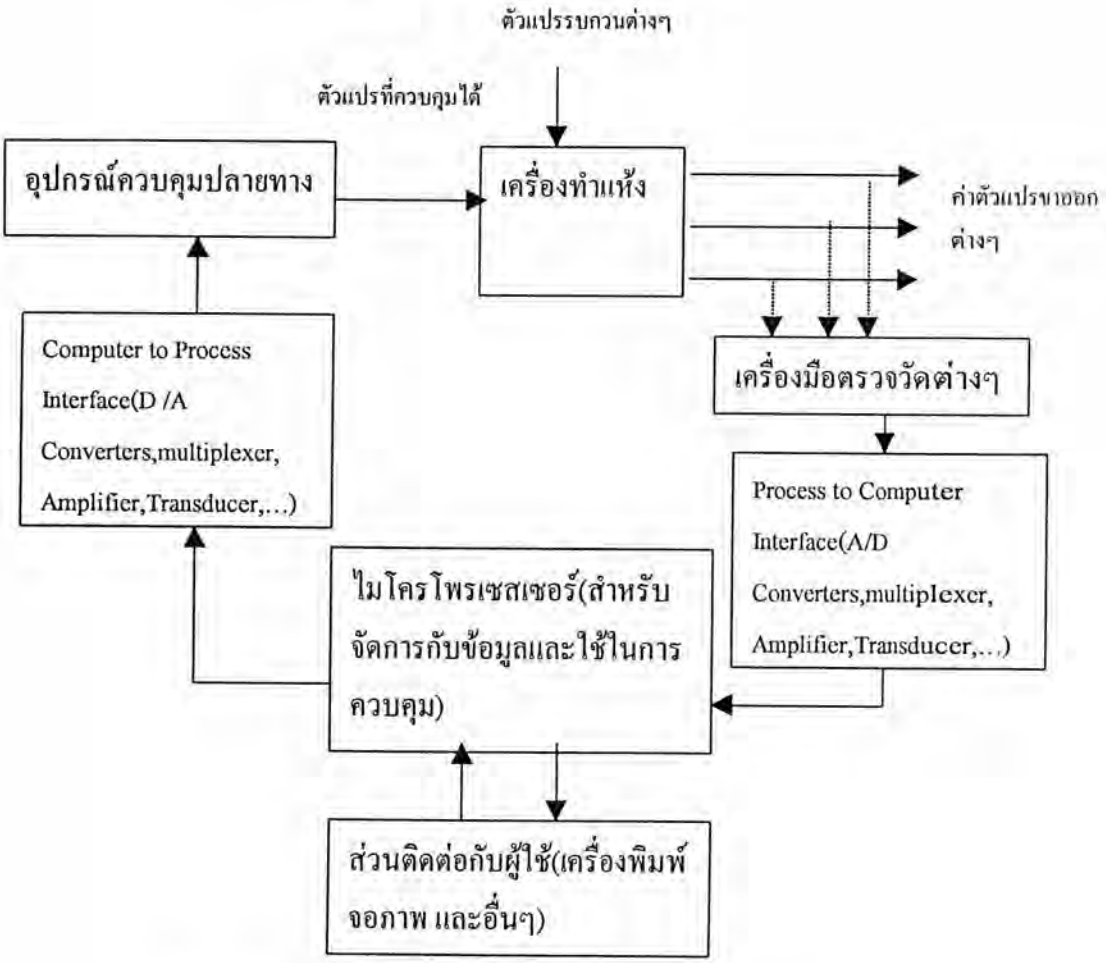
ที่แล้วมานั้นอุปกรณ์แบบอนาล็อกถูกใช้และยังคงใช้กันอยู่ในงานด้าน การควบคุมกระบวนการเป็นส่วนใหญ่ถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตามการมาถึงของอุปกรณ์ไมโครโพรเซสเซอร์ในต้นทศวรรษที่ 1970 และการพัฒนาของดิจิตอลคอมพิวเตอร์จนมีราคาถูก ทำให้มีการวิวัฒนาการของระบบการควบคุมต่างๆ ที่มีพื้นฐานอยู่บนการใช้คอมพิวเตอร์ และเครื่องควบคุมต่างๆ ที่สามารถทำหน้าที่ได้กว้างขวางกว่าการควบคุมโดยใช้อุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ควบคุมแบบอนาล็อก

แม้ว่าหน้าที่หลักของเครื่องควบคุมโดยคอมพิวเตอร์จะเป็นการนำอัลกอริทึมสำหรับควบคุมมาใช้ (PID หรืออัลกอริทึมอื่นๆ ที่สับสนซับซ้อนกว่า) การมีคอมพิวเตอร์ทำให้มีการพัฒนารูปแบบและอัลกอริทึมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นเพื่อให้การควบคุมกระบวนการมีความกระชับและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.3.3.6.1 ลักษณะและหน้าที่ของระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์

1. นำอัลกอริทึมควบคุมชั้นสูงและแบบคลาสสิกมาใช้งานโดยโปรแกรมลงบนหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์
2. สามารถทำงานกับวงจรควบคุมหลายๆวงจรได้พร้อมๆ กันโดยคอมพิวเตอร์เพียงหน่วยเดียว

3. สามารถเก็บข้อมูลจากเครื่องมือหลายๆ แบบ ทั่วทั้งกระบวนการ เพื่อจุดประสงค์ในการติดตามการเปลี่ยนแปลง และควบคุมทั้งระบบคอมพิวเตอร์ยังสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามจุดต่างๆ (เช่น มิเตอร์วัดความชื้นหรือระดับความชื้น) ได้
4. สามารถแสดงผลแบบ static หรือ dynamic บนจอภาพหรือหน่วยแสดงผลอื่นๆ
5. มีฟังก์ชั่นการคำนวณ
6. ทำหน้าที่รับและรวบรวมข้อมูลจากการวัดค่าต่างๆ ที่แตกต่างกันในกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหล ความดัน ความชื้น หรือระดับความชื้น
7. ช่วยในการวางแผน ปรับระบบให้เหมาะสม ในงานทางด้าน การควบคุมคุณภาพ และการควบคุมกระบวนการ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของระบบควบคุมโดยไมโครโพรเซสเซอร์

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมโดยไมโครโพรเซสเซอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์เก็บสะสมข้อมูลจากการวัดค่าต่างๆ ในกระบวนการ และคำนวณหาค่าของตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้จากอัลกอริทึมที่ใช้ควบคุม ซึ่งถูกโปรแกรมเก็บไว้ในหน่วยความจำ แล้วส่งคำสั่งการควบคุมไปยังกระบวนการนั้นๆ สัญญาณต่างๆ จะถูกเปลี่ยนด้วยเครื่องแปลงสัญญาณจากดิจิตอลไปเป็นอนาล็อก (D/A) และจากอนาล็อกไปเป็นดิจิตอล (A/D) ผู้ควบคุมเครื่อง/ผู้ปฏิบัติงาน จะสื่อสารกับระบบควบคุมผ่าน คีย์บอร์ด จอภาพ และเครื่องพิมพ์หรือพล็อตเตอร์

2.3.4. <u>ระบบควบคุมที่มีปัญญา</u> (intelligent control)

วิธีการควบคุมต่างๆ สำหรับเครื่องทำแห้งในอุตสาหกรรมทั้งหมดที่กล่าวไปจะมีพื้นฐานอยู่บนสมการทางคณิตศาสตร์หรืออัลกอริทึมต่างๆ ทฤษฎีการควบคุมแบบคลาสสิคจะมีสมการต่างๆ กันหลายแบบ หรือทรานซ์เฟอร์ฟังก์ชั่นต่างๆ และทฤษฎีการควบคุมสมัยใหม่จะใช้สมการดิฟเฟอแนเชียลแบบ first-order matrix differential equation ที่อิงกับวิธี state-space method โดยแนวทางเหล่านี้จะต้องมีองค์ความรู้และข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการไว้แล้ว โดยทำเป็นโครงสร้างที่ใช้วิเคราะห์บางอย่าง อย่างไรก็ตามจะพบความยุ่งยากมากมายระหว่างออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบควบคุมเครื่องทำแห้งที่อิงกับแนวทางเหล่านี้ ความยุ่งยากต่างๆ เกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ ต่อไปนี้

1. กระบวนการทำแห้งมีความซับซ้อน, มี time variant, และมีความสับสนแบบไม่เป็นเชิงเส้น
2. ตัวแปรเกี่ยวกับการทำแห้งบางตัว (เช่น คุณภาพและสีของผลิตภัณฑ์) ไม่สามารถวัดได้โดยตรง การวัดค่าอื่นๆ (เช่น ระดับความชื้น) ไม่สอดคล้อง, ไม่แม่นยำ, ไม่สมบูรณ์ หรือไม่อาจเชื่อถือได้เต็มที่
3. แบบจำลองของเครื่องทำแห้งต่างๆ โดยทั่วไปเป็นการประมาณค่าของกระบวนการจริงเท่านั้น และอาจต้องการเวลาในการคำนวณที่ยาวนาน
4. ขณะที่ดำเนินกระบวนการในสภาวะต่างๆ ในช่วงกว้างจะประสบความยุ่งยาก และได้รับผลจากสิ่งรบกวนระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่แน่นอน (stochastic disturbances)
5. บ่อยครั้งที่ไม่สามารถระบุค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบอย่างแม่นยำ ตัวอย่างเช่น ความไม่เป็นเชิงเส้น, Time delay, พารามิเตอร์ต่างๆและความซับซ้อนโดยรวมของระบบ

6. เครื่องทำแห้งมีตัวแปรที่ถูกควบคุมและตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้มีอันตรกิริยา (interacting effect) ต่างๆ ต่อกัน

ในการพยายามที่จะเอาชนะความยุ่งยากต่างๆ เหล่านี้จึงมีความต้องการต่างๆ ในอันที่จะแก้ไขประเมินวิธีการควบคุมแบบทั่วไปที่ใช้ในการดำเนินการทำแห้งเสียใหม่ ซึ่งนำไปสู่การค้นหาแนวคิดรวบยอดของการควบคุมเครื่องทำแห้งเพิ่มเติม ซึ่งได้แก่การทำการตัดสินใจในระดับสูง, การวางแผน, การเรียงลำดับ (sequencing), การเรียนรู้, ตรรกกะ และการใช้เหตุผลเป้าหมายต่างๆ ดังกล่าวได้นำไปสู่การเสนอตัวแปรที่เป็นมิติใหม่ในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม นั่นคือ "การควบคุมโดยผู้ปฏิบัติการที่เป็นมนุษย์"

วิธีในการควบคุมของผู้ปฏิบัติการควบคุมกระบวนการนั้นประกอบด้วยสามสิ่ง คือ การคาดการณ์, ความรู้ (แบบ "know-how") และประสบการณ์ ของผู้ปฏิบัติการควบคุม ซึ่งสามารถถูกพิจารณาว่าเป็นเซ็ตของกฎการตัดสินใจแบบ "กฎจากสามัญสำนึก" (rule of thumb)

ส่วนที่ใช้ติดต่อกันระหว่างคนกับเครื่องจักรที่ดีจึงเป็นที่ต้องการในการรวมคำสั่งการควบคุมของผู้ควบคุมเข้าไปในระบบที่เดินเครื่องแบบอัตโนมัติ วิธีการที่รวมส่วนที่ไว้ติดต่อกับมนุษย์ของเครื่อง (man/machine interface) กับ การควบคุมกระบวนการเข้าด้วยกัน ก็คือการใช้ระบบควบคุมที่มีปัญญา

มีแนวทางอยู่ 3 แนวทางใหม่ๆ ที่ใช้กับงานในแบบ real-time intelligent control นั่นคือระบบผู้เชี่ยวชาญ (expert system), เครื่องควบคุมแบบเครือข่ายใยประสาท (neural net controller หรือ neurocontroller) และเครื่องควบคุมฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic controller, FLC) (Astram and McAvoy, 1992) ระบบการควบคุมเหล่านี้อิงกับวิธีการประมวลผลข้อมูล 2 แบบคือ ใช้สัญลักษณ์(symbolic) และแบบกึ่งสัญลักษณ์(subsymbolic) (Prett and Garcia, 1988), (Quantrille and Liu, 1991)

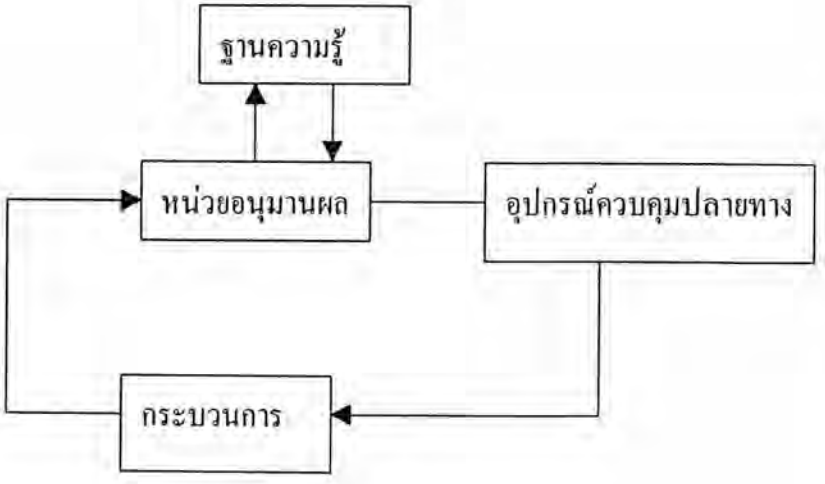
<u>กระบวนการประมวลผลแบบใช้สัญลักษณ์</u> ประกอบด้วยกฎการกำหนดคำสั่ง (production rules), เครือข่ายภาษา(semantic networks), กรอบงาน(frames) และ วัตถุ(object) โดยระบบที่สร้างขึ้นด้วยหลักการนี้เรียกว่า ระบบผู้เชี่ยวชาญ (expert system) และใช้ประโยชน์ในการหาเหตุผลเกี่ยวกับสภาวของระบบ (อุณหภูมิ, ความดัน และอื่นๆ) และโครงสร้างต่างๆ ของกระบวนการ

<u>กระบวนการประมวลผลแบบกึ่งสัญลักษณ์</u> ใช้หลักการทำงานของระบบเครือข่ายประสาทในทางชีวภาพ ระบบที่ถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้หลักการนี้เรียกว่า artificial neural networks ซึ่งมีประโยชน์ในการใช้หาเหตุผลที่เกี่ยวข้องกับแนวโน้มของกระบวนการ และการหาสหสัมพันธ์อันซับซ้อนระหว่างตัวแปรและสภาวะต่างๆ ของกระบวนการ

ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกพัฒนาจากแนวคิดของการนำประสบการณ์ผู้เชี่ยวชาญมาพัฒนาเป็นเกณฑ์ในการประมวลผลการตัดสินใจให้อยู่ในรูปแบบเชิงปริมาณ ทฤษฎีของเซตฟัซซี่ทำให้ได้วิธีการทำงานที่ได้ผลดีเพื่อจัดการกับข้อมูลต่างๆ ที่มีความคลุมเครือ และเพื่อนำวิธีการทำการควบคุมที่ใช้ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญมาแปลงเป็นวิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติ แม้จะไม่เป็นที่คุ้นเคยในปัจจุบัน สำหรับการประยุกต์ใช้ควบคุมเครื่องทำแห้ง ได้มีการคาดหมายว่าเครื่องทำแห้งที่ซับซ้อนจะสามารถใช้ประโยชน์จากการควบคุมแบบดังกล่าวในทศวรรษหน้า

2.3.4.1. Rule-Based Expert Control Systems

ระบบผู้เชี่ยวชาญเป็นระบบฐานความรู้ (knowledge-based system) ที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์ร่วมด้วย และใช้กระบวนการเชิงสัญลักษณ์ และกระบวนการอนุมานในแบบต่างๆ เพื่อจำลองกระบวนการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญในการแก้ปัญหา ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ระบบฐานความรู้

<u>ส่วนประกอบ</u> ระบบควบคุมของผู้เชี่ยวชาญประกอบด้วยสิ่งต่างๆ ดังนี้ (Quantrille and Liu, 1991), (Gevarter, 1987), (Bernard, 1988), (Samdani and Fouhy, 1992)

1. <u>ฐานความรู้</u> เกี่ยวกับข้อเท็จจริงของกระบวนการ, กฎต่างๆ, และ heuristics ที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการ ซึ่งหาได้จากความรู้เกี่ยวกับการทำงานของโรงงาน, หลักการทางวิศวกรรม, และข้อมูลทางสถิติและจากการสังเกต ผู้ควบคุมเครื่องจักรที่มีทักษะดี (โดยการสัมภาษณ์, ให้กรอกแบบสอบถาม และการบันทึกคำสั่งการที่มาจากมนุษย์ลงในแบบ on-line)
2. <u>ตัวอนุมานผล</u> (an inference engine หรือ control structure) ใช้วิธีการอนุมาน เพื่อหาข้อสรุปต่างๆและอนุมานคำสั่งการที่ถูกต้องออกไป โดยอิงกับข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในฐานความรู้และค่าสภาวะ ณ ปัจจุบันของกระบวนการ
3. <u>ฐานข้อมูลรวม</u> สำหรับเก็บเส้นทางของสภาวะระบบ, ข้อมูลขาเข้า, และประวัติของกระบวนการที่ตรงกัน
4. <u>ส่วนติดต่อกับผู้ใช้</u> ที่จะทำให้มีการสื่อสารกันได้ระหว่างผู้ใช้และโปรแกรมคอมพิวเตอร์

<u>การนำไปใช้</u> ระบบผู้เชี่ยวชาญใช้ในงานเกี่ยวกับการควบคุมกระบวนการหลายอย่าง เช่น (Prett and Garcia, 1988), (Quantrille and liu, 1991), (Bernard, 1988), (Tzouanas et al., 1988)

1. การทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงสุด(optimization), การจัดการกระบวนการ, การวิเคราะห์แนวโน้ม, กระบวนการเตือน (alarm processing), การออกแบบระบบควบคุม และการควบคุมแบบปรับตัวเอง adaptive control
2. เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมแบบคลาสสิก โดยการระบุให้ทราบถึงความล้มเหลวของอุปกรณ์ตรวจวัด, ระดับความอิ่มตัวของวาล์ว และการฝึกการทำงานของกระบวนการ
3. การตรวจวัดความผิดพลาด, การวินิจฉัย และการแก้ปัญหา
4. ให้คำปรึกษาแก่เครื่องควบคุมพื้นฐานประเภทเดียวกับ PID แก่ขั้นตอนในการทำการ เปิด/ปิด (start up/shutdown)

2.3.4.2. ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Control System, FLC)

ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกเป็นวิธีการควบคุมโดยใช้ฐานความรู้ knowledge-based control ในลักษณะตัวแปรฟัซซี่เชิงภาษาพูด เพื่อจัดการกับพลวัตของกระบวนการและสภาวะแวด

ล้อมซึ่งมีความไม่แน่นอน FLCใช้ฟัซซี่ลอจิกในการเปลี่ยนตัวแปรเชิงภาษาพูด (linguistic variable) ไปเป็นคำสั่งการควบคุมเชิงปริมาณที่มีค่าแน่นอน

นิยามของศัพท์ทางเทคนิคบางคำที่ใช้ในระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกแบบต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คำที่ใช้ในการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก

"เซตฟัซซี่" (fuzzy set)	คือเซตที่ค่าการเป็นสมาชิกไม่ได้ถูกนิยามเอาไว้อย่างเคร่งครัดและชัดเจน (crisp) แต่จะอนุญาตให้วัตถุต่างๆ ในเซตมีค่าการเป็นสมาชิกอยู่ในระดับ 0 ถึง 1
"ตรรกศาสตร์คลุมเครือ" หรือที่มักเรียกทับศัพท์ว่าฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic)	เป็นตรรกศาสตร์ที่ใช้สเตทเมนท์ที่มีการแบ่งเป็นเกรดต่างๆ มากกว่าแบบที่แบ่งเป็นจริงหรือเท็จอย่างแน่นอน ซึ่งใกล้เคียงกับลักษณะวิธีคิดของมนุษย์มากกว่าระบบตรรกศาสตร์ที่มีมาแต่เดิม ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วฟัซซี่ลอจิกจะทำให้สามารถทำการประมาณค่าที่ไม่แน่นอน หรือไม่แม่นยำของธรรมชาติที่มีอยู่ในความเป็นจริงได้
"ตัวแปรเชิงภาษา"หรือตัวแปรเชิงคำพูด(linguistic variables)	เป็นตัวแปรที่มีค่าเป็นคำพูดที่ใช้ในภาษามนุษย์ปกติ ใช้เป็นตัวแทนของเซตฟัซซี่ในปัญหาที่กำหนด เช่นมักจะใช้คำพูดว่า "มีค่าเป็นบวกมาก" (Positive big, PB) "มีค่าเป็นบวกปานกลาง" (Positive medium, PM), "มีค่าเป็นบวกเล็กน้อย" (Positive small, PS), "มีค่าเป็นศูนย์" (zero, ZO หรือ ZE), "มีค่าเป็นลบเล็กน้อย" (Negative small, NS), "มีค่าเป็นลบปานกลาง" (Negative medium, NM) และ "มีค่าเป็นลบมาก" (Negative Big, NB) และในทางปฏิบัติจะทำการนิยามค่าในเชิงปริมาณที่วัดได้จริงในกระบวนการให้เป็นสมาชิกของเซตเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น ในการทำแห้งอาจกล่าวว่าอุณหภูมิขนาด 170 องศาเซลเซียส มีค่าการเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต "ร้อนมาก(Positive Big)" เท่ากับ 1.0 และ มีค่าการเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต "ร้อนปานกลาง(Positive Medium)" เท่ากับ 0.5 เป็นต้น

ระบบควบคุมแบบดิจิตอลไมโครโพรเซสเซอร์นั้น มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นกว่าระบบควบคุมที่ใช้อนาล็อก มีอัลกอริทึมต่างๆ ให้เลือกใช้ได้เป็นจำนวนมาก สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว ราคาไม่แพง สามารถใช้กับงานที่มีความซับซ้อนได้

อัลกอริทึมที่ใช้ในระบบควบคุมแบบดิจิตอลนั้น อาจมีได้หลายวิธี เช่น PID (Proportional-integral-derivative), model reference adaptive control (MRAC), หรือฟัซซี่ลอจิก ระบบควบคุมแบบ PID นั้นใช้ได้ผลดี กับกระบวนการที่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาเข้าและขาออกเป็นอย่างดี แต่ไม่เหมาะกับกระบวนการที่ไม่มีความชัดเจนระหว่างตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก หรือกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (Li and Lau, 1989) เทคนิค MRAC นั้นเป็นวิถีทางหนึ่งที่จะจัดการกับปัญหาเหล่านี้ โดยการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องควบคุม โดยใช้อัลกอริทึมสำหรับปรับเปลี่ยนการควบคุมที่เหมาะสม และใช้การเปรียบเทียบระหว่างตัวแปรขาออกจากระบบ กับแบบจำลองที่ใช้อ้างอิง วิธีนี้ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาเข้า (input) และตัวแปรขาออก (output) แบบจำลองสามารถสร้างได้ แต่ไม่ง่ายนักที่จะสร้างขึ้น แม้ว่าได้พัฒนาขึ้นมาแล้วก็ตาม ก็อาจซับซ้อนเกินกว่าจะทำการคำนวณได้เร็วพอสำหรับใช้ในกระบวนการควบคุมได้

วิธีการที่ใช้ฟัซซี่ลอจิกนั้น ตัวแปรขาเข้า ตัวแปรขาออก และคำสั่งควบคุมจะถูกระบุในเทอมตัวแปรเชิงคำพูดที่ใช้ โดยมีผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้กำหนดค่าการตอบสนองโดยไม่ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนของกระบวนการ พื้นฐานความรู้ที่นำมาจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญถูกนำไปใช้ร่วมกับการกำหนดกฎเกณฑ์ต่างๆเพื่อให้มีลักษณะที่ค่อนข้างง่ายต่อการเข้าใจ ความรู้นี้มักจะถูกแสดงอยู่ในรูปและกฎต่างๆ และการคำนวณขั้นต่อไปที่ต้องการสำหรับการประเมินกฎสามารถเร่งให้มีความเร็วมากขึ้นได้ โดยใช้คอนโทรลเลอร์ชิพ ที่ออกแบบมาใช้สำหรับการคำนวณแบบฟัซซี่ลอจิกโดยเฉพาะ ซึ่งในขณะนี้มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาด เครื่องควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกนั้น ได้ประสบความสำเร็จกับการประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี 1980 โดยตัวอย่างการใช้งานมีอยู่อย่างแพร่หลาย (Yan, Ryan and Power, 1994)