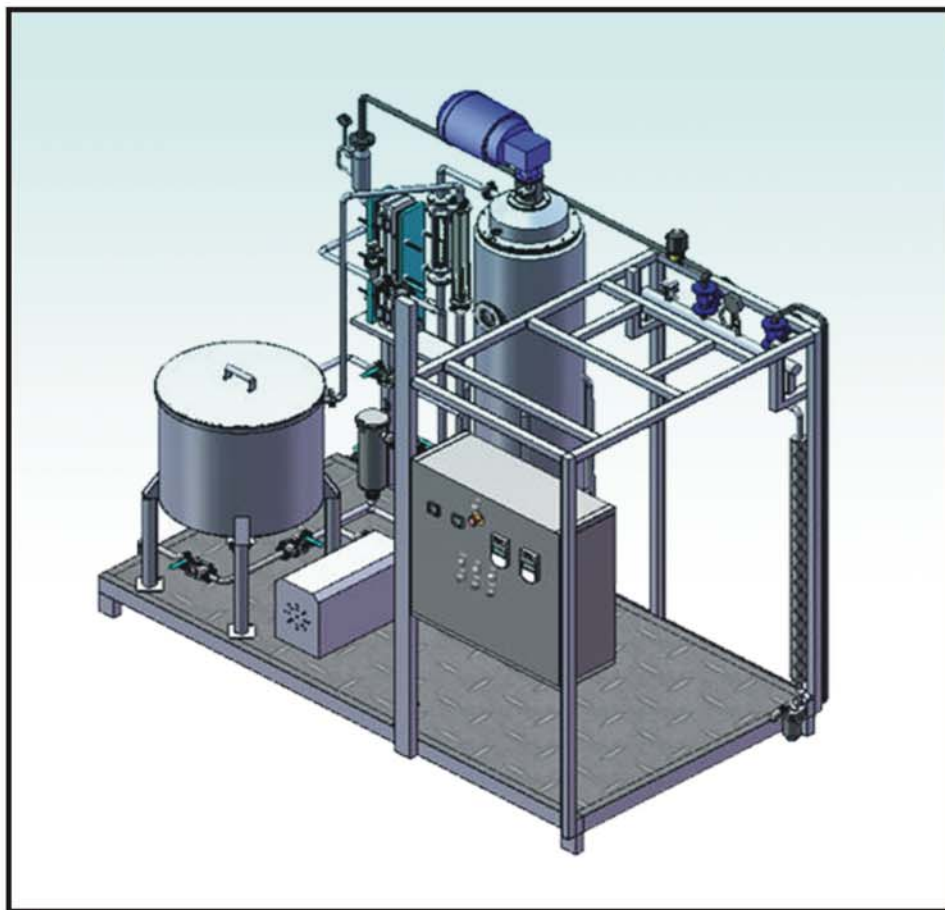




จ.จ.

โครงการวิจัยที่ ภ. 50-02 / ย. 4 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

**การพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิต
ผลิตภัณฑ์และ/หรือเครื่องตีผสมสุภาพ
ด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ**



**สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 50-02

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ

โครงการย่อยที่ 4

การพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์และ/หรือ
เครื่องมือเสริมสุขภาพด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์และ/หรือ
เครื่องมือเสริมสุขภาพด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ

โดย

จักรกฤตม์ บุญญกฤติ

วิมลศรี พรรชนประเทศ

ประไพภัทร คลังทรัพย์

ดำรงชัย สิทธิสำอาง

ณรงค์เดช อาษา

บรรณาธิการ

ลิจิต หาญจางสิทธิ์

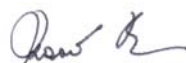
บุญเรียม น้อยชุมแพ

พิสุทธิ พลับสวาท

วว., กรุงเทพฯ 2554

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นางเกษมศรี หอมชื่น)

ผู้ว่าการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ เรือเอกศรีศักดิ์ ตรังวัชรกุล ที่ได้กรุณาให้โอกาสคณะผู้วิจัยได้ทำงานวิจัย ซึ่งคณะผู้วิจัยยังไม่มีประสบการณ์ แต่ท่านได้ให้โอกาส ซึ่งจะหาผู้ให้โอกาสอย่างนี้ยากมาก. ขณะที่ดำเนินการวิจัย ท่านยังได้สละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำ, ชี้แนะ และช่วยแก้ปัญหา, อุปสรรค ต่างๆ ให้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า.

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณบุพการี, ครอบครัว และพนักงานฝ่ายเทคโนโลยีอาหาร ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดี.

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากการวิจัยฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน.

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	99
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	101
4. สรุปผลการทดลอง	105
5. บรรณานุกรม	106
ภาคผนวก ก	107
ภาคผนวก ข	109

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. ช่วงของอัตราการไหลสูงสุด	59
ตารางที่ 2. อัตราความดันโดยทั่วไปสำหรับเครื่องมือวัดแบบหลอดแก้ว	59
ตารางที่ 3. ค่าจำกัดความหนืดโดยทั่วไปที่ใช้กับลูกลอย	60
ตารางที่ 4. ความยาวเทียบเท่าของชุดอุปกรณ์ในระบบท่อ	78
ตารางที่ 5. ผลของอุณหภูมิของน้ำต่อระยะยก	81
ตารางที่ 6. Sizing Steam Pipes (kg/hr)	86
ตารางที่ 7. ค่า Safety factor สำหรับการเลือก Steam trap ของแต่ละชนิด	88
ตารางที่ 8. สัดส่วนความสามารถการระบายคอนเดนเสทที่ลดของกับดักไอน้ำเมื่อมี Back Pressure	89
ตารางที่ 9. ค่าสีและ ACW Anti-oxidant activity ของน้ำพักเชียงดาอ้างอิง	102
ตารางที่ 10. ค่าสีและ ACW Anti-oxidant activity ของน้ำพักเชียงดาแห่งสอบเทียบ อุณหภูมิการสกัดที่ 95 °ซ. (+/- 1.5 °ซ.)	103

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1. สูตรโครงสร้างของวิตามินอีโทโคฟีรอน (A) และโทโคโททรินอล (B)	12
รูปที่ 2. สูตรโครงสร้างของแคโรทีนอยด์บางชนิด	13
รูปที่ 3. สูตรโครงสร้างเรโซแนนซ์ของโมเลกุล บีตา-แคโรทีน	14
รูปที่ 4. สูตรโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกบางชนิด	15
รูปที่ 5. โครงสร้างทางเคมีของสารให้สีฟลาโวนอยด์	18
รูปที่ 6. โครงสร้างทางเคมีของสารให้สีพวกเทอร์ปีนอยด์	18
รูปที่ 7. โครงสร้างทางเคมีของสารให้สีพวกแอนทราควิโนนและแนพทาควิโนน	19
รูปที่ 8. โครงสร้างทางเคมีของสารที่ให้สีพวกแอลคาลอยด์	19
รูปที่ 9. ค่าที่อ่านด้วยปริภูมิสี Yxy (Yxy color space)	22
รูปที่ 10. ความไวแสงของตามนุษย์ (Color-matching function/1931 Standard Observer)	22
รูปที่ 11. ไดอะแกรมสี x, y ปี 1931	23
รูปที่ 12. ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี a*, b*	24
รูปที่ 13. ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง	25
รูปที่ 14. ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง	25
รูปที่ 15. ค่าสัมประสิทธิ์ L* a* b* ในไดอะแกรมสี	26
รูปที่ 16. ค่าโครมาและความสว่าง	27
รูปที่ 17. การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบต่อเนื่อง (Continuous liquid-liquid extraction)	28
รูปที่ 18. เครื่องสกัดอย่างต่อเนื่อง หรือเครื่องสกัดซอกเลต (Soxhlet extraction)	30
รูปที่ 19. สัดส่วนของส่วนประกอบต่างๆ สำหรับถึงกวนมาตรฐานแบบมีครีปและไม่มีครีป	34

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 20. สภาพของการเกิดวังวน (Vortex) ในการกวนในถังกวนแบบไม่มีคิริบ	35
รูปที่ 21. ความสัมพันธ์ของความหนืดของของเหลวที่มีผลต่อการเลือกชนิดของใบกวน	36
รูปที่ 22. ใบกวนชนิด Marine propeller	38
รูปที่ 23. ใบกวนชนิด Basic straight blade paddle	38
รูปที่ 24. ใบกวนชนิด Large blade paddle	39
รูปที่ 25. ใบกังหัน (Turbine)	40
รูปที่ 26. ใบกวนชนิด Modified turbine high shear	41
รูปที่ 27. ใบกวนชนิด Sew tooth edge modified turbine shear	41
รูปที่ 28. อัตราการไหลเชิงปริมาตรมีความสัมพันธ์กับพื้นที่และความเร็วเชิงเส้น	43
รูปที่ 29. สมการของความต่อเนื่อง	43
รูปที่ 30. ทฤษฎีของเบอร์นูลลี	45
รูปที่ 31. ลักษณะการไหลในย่านต่างๆ สามรูปแบบ	45
รูปที่ 32. ลักษณะโปรไฟล์ความเร็วของการไหลแบบรายเรียบ	46
รูปที่ 33. โปรไฟล์ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเปรียบเทียบ	47
รูปที่ 34. โปรไฟล์ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน	47
รูปที่ 35. ผลกระทบของช่องอืดเยวต่อโปรไฟล์การไหล	48
รูปที่ 36. ระยะห่างที่จำเป็นด้านต้นและปลายกระแสน้ำสำหรับอริฟิซหรือนอสเซิลการไหล	49
รูปที่ 37. หลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดแบบวัดพื้นที่	50
รูปที่ 38. ส่วนประกอบของโรตاميเตอร์	52
รูปที่ 39. โรตاميเตอร์แบบท่อโลหะ	53

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 40. แบบออริฟิซกับปลั๊กทรงกรวย	53
รูปที่ 41. แบบลูกสูบ	54
รูปที่ 42. ส่วนประกอบของโรตารีเตอร์	56
รูปที่ 43. โครงรับลูกลอย	56
รูปที่ 44. ลักษณะรูปร่างลูกลอย	57
รูปที่ 45. การจัดวางระบบท่อสำหรับเครื่องมือวัดแบบพื้นที่โดยทั่วไป	62
รูปที่ 46. การติดตั้งระบบท่อบายพาสสำหรับเครื่องมือวัดแบบพื้นที่	64
รูปที่ 47. การจัดวางระบบท่อสำหรับเครื่องมือวัดแบบพื้นที่ที่ใช้งานกับก๊าซโดยทั่วไป	64
รูปที่ 48. เครื่องสูบแบบ plunger และชนิดลูกสูบ	66
รูปที่ 49. เครื่องสูบน้ำอัดด้านเดียว (single acting pump)	66
รูปที่ 50. เครื่องสูบน้ำอัดสองด้านเดียว (double acting pump)	67
รูปที่ 51. เครื่องสูบน้ำชนิดไดอะแฟรม (diaphragm)	70
รูปที่ 52. เครื่องสูบน้ำชนิดเฟือง (gear pump) ขับภายนอก	70
รูปที่ 53. เครื่องสูบน้ำชนิดใบพัด (vane pump)	71
รูปที่ 54. เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (centrifugal pump)	72
รูปที่ 55. ใบพัดที่ใช้ในเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (centrifugal pump)	72
รูปที่ 56. รูปร่างลักษณะของใบพัด	73
รูปที่ 57. เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง	75
รูปที่ 58. ส่วนต่างๆ และนิยามในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (System static head)	76
รูปที่ 59. เส้นโค้งเสถียรภาพทั้งหมดในระบบท่อ	79

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 60. จุดทำงานร่วมระหว่างเครื่องสูบกับระบบท่อ	79
รูปที่ 61. เครื่องสูบต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน	80
รูปที่ 62. เสดด้านคูคเป็นบวคสุทธิ (NPSH)	82
รูปที่ 63. ความดันที่ทางเข้าเครื่องสูบ	83
รูปที่ 64. ไคอะแกรมคิคตั้งระบบวาล์วคคแรงคคก่อนใช้งาน	88
รูปที่ 65. การคคินท้อแยก (ท้อหลักเป็น ไอพสมน้ำที่กลั่นตัว)	89
รูปที่ 66. การคคินท้อแยก (ท้อหลักเป็น ไอแห้ง)	90
รูปที่ 67. น้ำที่จูกอยู่ตรงมุมท้อจะก่อให้เกิดแรงกระแทก	90
รูปที่ 68. ใช้ข้องอ 45°	91
รูปที่ 69. การงอท้อเพื่อรับการบิคตัวเมื่อมีการขยยตัว	91
รูปที่ 70. การงอท้อเพื่อรับการบิคตัวโดยการยิดที่จูกๆ หนึ่ง	91
รูปที่ 71. การจัดเรียงอุปกรณ์ระบบไอน้ำ	92
รูปที่ 72. แบบแสดงกระบวนการสกัก	96
รูปที่ 73. สักส่วนความสัมพันธ์ระหว่างไบกวนกับหอสกักแบบมีคริบ	97
รูปที่ 74. ไบกวน	97
รูปที่ 75. แบบแสดงส่วนหอสกัก	98
รูปที่ 76. เครื่องสกักสารด้านอนุมูลอิสระ	101
รูปที่ 77. ด้านหน้าเครื่องสกักฯ	101
รูปที่ 78. ด้านหลังเครื่องสกักฯ	101
รูปที่ 79. ด้านซ้ายเครื่องสกักฯ	102
รูปที่ 80. ด้านขวาเครื่องสกักฯ	102
รูปที่ 81. ACW Anti-oxidant activity ของน้ำฝักเชียงคค	103

DEVELOPMENT OF PROCESS MACHINERY FOR THE PRODUCTION OF HEALTH DRINK WITH ANTIOXIDANT

**Chakkrit Bunyakrit, Wimolsri Prathanaprates, Prapaipat Klungsup,
Damronchai Sitthisamang and Narongdet Asa**

ABSTRACT

Continuous Solid-liquid extraction was applied in an Antioxidant extractor prototype which was designed to use both water and water-alcohol mixture as the solvent at the capacity of 100 l., the maximum controllable temperature of 100°C. and for extraction of either fresh and dry locally grown vegetable. A 120-mesh screen was installed in the extraction column to separate vegetable remaining. The vertically adjustable propeller was also installed with adjustable speed of 1-300 rpm and circulation rate of 50-150 liters per hr. All materials and equipment used in this prototype were made of IP 65 quality grade and food grade materials.

Phak Chiang Da vegetable or *Gymnema inodorum* Decnc. was used for the efficiency test of the extractor, and water as a solvent. The results of the extraction tests were compared with those performed in the laboratory in terms of colour values and antioxidant activities of the extracted solution using photochemiluminescence (PLC) method. The results showed that the optimal conditions from the laboratory were 0.35% of dry Phak Chiang Da, 90°C. ($\pm 1.5^\circ\text{C}$.) extraction temperature for 3 min. while those of the prototype extractor were also 0.35% of Phak Chiang Da at 95°C. ($\pm 1.5^\circ\text{C}$.) extraction temperature, and 5-7 min. extraction time, at 100 rpm propeller speed of 20 cm. high, and circulation rate of 100 liter per hr. Therefore, the resulted color value (Lab) and antioxidant activity (vit C equ : n mol/15 μg) from the laboratory trials were 57.50, (-1.74), 24.27 and 2.1294, respectively. The corresponding results from extractor prototype were 57.37, (-1.82), 25.46 and 2.0012, respectively.

การพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์และ/หรือ เครื่องดื่มเสริมสุขภาพด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ

จักรกฤตม์ บุญญกฤติ¹, วิมลศรี พรรชนประเทศ¹, ประไพภัทร คลังทรัพย์²,
ดำรงชัย สิทธิสำอาง¹ และณรงค์เดช อาษา¹

บทคัดย่อ

เครื่องสกัดสารต้านอนุมูลอิสระต้นแบบ ใช้กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบต่อเนื่อง (Continuous solid-liquid extraction). เครื่องสกัดฯ นี้ถูกออกแบบให้สามารถใช้ตัวทำละลายได้ทั้ง น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำผสมแอลกอฮอล์ ขนาดความจุ 100 ลิตร, ความคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 100 °ซ. สามารถใช้สกัดวัตถุดิบประเภทพืชผักพื้นบ้านได้ทั้งชนิดแห้งและสด. ภายในหอสกัดจะมีตะแกรง เพื่อป้องกันเศษของพืชผักพื้นบ้าน, ความละเอียดสูงสุด 120 เมช, ไบวอนสามารถปรับได้หลาย ระดับ, รอบไบวอนปรับได้ตั้งแต่ 1-300 รอบต่อนาที, ปรับอัตราการไหลวนตั้งแต่ 50-150 ลิตรต่อ ชั่วโมง. อุปกรณ์ทั้งกระบวนการใช้อุปกรณ์ระดับ IP 65. ท่อ, วาล์ว และอุปกรณ์ประกอบใช้วัสดุเกรดคุณภาพสำหรับใช้กับอาหาร.

วัตถุดิบในการวิจัย ได้แก่ ผักเชียงดาแห้ง, ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย. สอบเทียบประสิทธิภาพ เครื่องสกัดฯ โดยสอบเทียบผลการสกัดที่ได้จากเครื่องสกัดฯ กับผลการสกัดจากห้องปฏิบัติการ. ค่าที่สอบเทียบใช้ค่าเดียวกับค่าตรวจวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี photochemiluminescence (PLC). อัตราส่วนผักเชียงดาแห้งห้องปฏิบัติการร้อยละ 0.35, อุณหภูมิการสกัดที่ 90°ซ. (± 1.5 °ซ.), ใช้เวลา การสกัด 3 นาที. ส่วนสภาวะการสกัดจากเครื่องสกัดฯ อัตราส่วนผักเชียงดาแห้งร้อยละ 0.35, อุณหภูมิการสกัด 95°ซ. (± 1.5 °ซ.), เวลาการสกัดที่เหมาะสม 5-7 นาที, ความเร็วรอบไบวอน 100 รอบต่อนาที, ระดับไบวอน 20 เซนติเมตร, อัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง. ผลที่ได้จากสภาวะ ดังกล่าว ค่าสี (Lab) และ Anti activity (vit C equ : n mol / 15 μ g) ได้แก่ 57.50 , (-1.74) , 24.27 และ 2.1294, ตามลำดับ. ส่วนจากเครื่องสกัดฯ ได้ 57.37, (-1.82), 25.46 และ 2.0012, ตามลำดับ.

¹ ฝ่ายเทคโนโลยีอาหาร, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, (วว.)

² ฝ่ายเกษตรและผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ, วว.

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหาและที่มาของโครงการ

รัฐบาลได้มีนโยบายด้านอาหารปลอดภัย เพื่อให้ประชาชนมีผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความปลอดภัยจากการปนเปื้อนทางด้านจุลินทรีย์และสารเคมีที่ก่ออันตรายกับผู้บริโภค. ในขณะที่เดียวกันได้ส่งเสริมให้ประชาชนมีอาหารที่ผลิตขึ้นอย่างถูกสุขลักษณะ. ผลิตภัณฑ์อาหารดังกล่าวมีคุณภาพเพื่อที่จะเสริมสุขภาพของผู้บริโภคให้แข็งแรง, ปราศจากโรคภัยที่คุกคามต่อสุขภาพของผู้บริโภค. ความตื่นตัวของประชาชนผู้บริโภค ในอันที่ป้องกันโรคภัยไข้เจ็บด้วยการออกกำลังกาย, ความตื่นตัวของประชาชนอันเนื่องจากการป้องกันโรคที่เป็นโดยไม่ได้ติดต่อ, อันเนื่องจากการบริโภคอาหารที่ไม่ถูกต้อง ดังเช่น โรคหัวใจ, โรคเกี่ยวกับกระดูก, โรคความดันโลหิตสูง, โรคมะเร็ง, โรคต่อกระเจก และโรคเบาหวาน ซึ่งเป็นโรคที่เกิดกับประชาชนในอันดับต้นๆ ที่ทำลายและก่อให้เกิดความเสียหายทางสังคมและทางเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก.

อาหารประเภทที่มีสารต้านอนุมูลอิสระเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งพบมากในพืชผัก. การบริโภคอาหารที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ จะส่งผลดีต่อร่างกาย เช่น ช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อโรคมะเร็ง, โรคหัวใจและหลอดเลือด, ต่อกระเจก และชะลอความแก่ (โลวีกรรณ์ 2549). โดยสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ ได้แก่ :

1. กลุ่มวิตามิน เช่น วิตามินอี พบมากในน้ำมันจากเมล็ดพืชต่างๆ, วิตามินซี พบมากในผักใบเขียวทั่วไป.
2. แครโทีนอยด์ ซึ่งมีหลายชนิด ได้แก่ บีตา-แคโรทีน พบมากในพืชสีเหลืองส้ม, โไลโคพีน พบมากในมะเขือเทศ, แดงโม, ส่วนแซนโทฟิลล์ เช่น ลูกทิมและซีแซนทีน พบมากในผักขม, บร็อกโคลี และกลุ่มบีตา-คริบโตแซนทีน พบมากในมะม่วง, ส้ม, มะละกอ.
3. สารประกอบฟีนอลิก เช่น ฟลาโวนอยด์ พบมากในชาเขียวและแอปเปิล, เจนิสทิน พบมากในถั่วเหลือง และซัลไฟด์ พบมากในพืชตระกูลหัวหอม, กระเทียม, พืชตระกูลกระหล่ำปลี.

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศที่อุดมสมบูรณ์ด้วยอาหารพืชผัก สมุนไพรนานาชนิด, ซึ่งอาหารประเภทพืชสมุนไพรเป็นอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย. ในพืชผักจะมีสารที่เรียกว่า สารต้านอนุมูลอิสระหรือแอนติออกซิแดนส์ ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดกระบวนการออกซิเดชันได้ดี, หรือกล่าวได้ว่า สามารถต้านอนุมูลอิสระจะช่วยยับยั้งอนุมูลอิสระไม่ให้มีผลในการทำลายเซลล์ที่ดี.

การบริโภคอาหารที่มีสารต้านอนุมูลอิสระมีผลดีต่อร่างกาย ได้แก่ :

1. ลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งได้หลายชนิด ช่วยยับยั้งการกลายพันธุ์.
2. ลดโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดแดงแข็ง.
3. ลดโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่อกระดูกในผู้สูงอายุ.
4. ชะลอความเสื่อมชราของเซลล์.

จากการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ในระดับห้องปฏิบัติการ ผลิตภัณฑ์เสริมเพื่อสุขภาพ ซึ่งมี ส่วนประกอบของสารต้านอนุมูลอิสระ เพื่อป้องกันโรคอันเกิดจากสารอนุมูลอิสระ, โรคที่ไม่เกิดจากการติดต่อทั้งหลาย. สารอนุมูลอิสระจากผักพื้นบ้าน เช่น ผักเชียงดา, ผักหวาน, ชา, เป็นต้น, ด้วยคุณสมบัติของสารต้านอนุมูลอิสระจากผักพื้นบ้าน, ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระโดยจะดำเนินการขยายขนาด, ให้ได้เครื่องสกัดสารสกัดจากผักพื้นบ้านระดับโรงงาน นำทางต้นแบบ. ข้อมูลเหล่านี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ประกอบการภาคอุตสาหกรรมและบุคคลทั่วไป ที่สนใจ.

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ ในระดับห้องปฏิบัติการสู่โรงงานนำทางหรือระดับชุมชน.
2. เพื่อเป็นแหล่งถ่ายทอดเทคโนโลยีและนวัตกรรมเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเสริมสุขภาพสู่เชิงพาณิชย์.

1.3 นิยามศัพท์เฉพาะ

อนุมูลอิสระ (Free radical) หมายถึง สารที่เกิดจากกระบวนการเผาผลาญอาหารในร่างกาย รวมถึงจากมลพิษต่างๆ เช่น โอโซน, โลหะหนัก, ควันบุหรี่, เป็นต้น. อนุมูลอิสระมีอิเล็กตรอนวงนอกไม่ครบแปด จึงต้องการที่จะเหนี่ยวนำสารชนิดอื่น เพื่อให้อิเล็กตรอนวงนอกของตัวเองครบแปด, ให้อยู่ในสถานะที่เสถียร. อนุมูลอิสระเหล่านี้จะทำลายโครงสร้างและหน้าที่ของผนังเซลล์ ก่อให้เกิดความผิดปกติต่างๆ.

สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) เป็นสารประกอบจำพวกวิตามิน, แร่ธาตุ, ฟลาโวนอยด์, แคโรทีนอยด์, สารประกอบฟีนอลิก, เอนไซม์, ที่ช่วยป้องกันร่างกายจากอนุมูลอิสระ. โดยจะให้ อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระหมดสภาพไป ซึ่งอนุมูลอิสระพวกนี้เกิดขึ้นจาก

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุล หรือสารประกอบภายในร่างกาย หรือจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ร่างกาย เช่น โลหะหนัก, อาหาร หรืออากาศที่หายใจเข้าไป, เป็นต้น.

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) หมายถึง สารที่นอกจากมีคุณค่าทางอาหารแล้ว ยังสามารถป้องกันโรคบางโรคได้ เช่น สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) สารกลุ่มแคโรทีนอยด์ เช่น บีตา-แคโรทีน, วิตามินอี, วิตามินซี และกลุ่มวิตามินบี เป็นต้น.

แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) เป็นรงควัตถุที่ให้สีเหลือง, ส้ม และส้มแดง. มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{40}H_{56}$ เป็นสารประกอบพวกอะลิฟาติกและอะลิไซคลิก (Aliphatic-Alicyclic). ในหนึ่งโมเลกุล ประกอบด้วยคาร์บอน 40 อะตอม คืออยู่ในรูปของไอโซพรีน (Isoprene group) 8 โมเลกุล มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่และสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นวิตามิน เอ ได้เมื่อเข้าสู่ร่างกาย.

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลสำเร็จของการพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเสริมสุขภาพ ได้แก่ :

- ต้นแบบเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเสริมสุขภาพ.
- เทคโนโลยีการผลิต ผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพ.
- ผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพที่มีคุณภาพที่ได้มาตรฐาน สม่่าเสมอ ปลอดภัยต่อผู้บริโภค และมีอายุการเก็บรักษาที่นาน.

ผู้ที่จะนำผลการพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเสริมสุขภาพไปใช้ประโยชน์.

- การบริการสู่ภาคอุตสาหกรรมสำหรับผู้ประกอบการที่สนใจเทคโนโลยีการแปรรูปกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเสริมสุขภาพ.
- ก่อให้เกิดอุตสาหกรรมแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าผัก ผลไม้.
- เป็นการยกระดับราคา ผัก ผลไม้ ซึ่งเป็นผลผลิตของเกษตรกรให้สูงขึ้น.

1.5 แนวคิดทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

1.5.1 อนุมูลอิสระ

ปัจจุบัน พบว่า โรคที่เป็นสาเหตุการเสียชีวิตของมนุษย์ในอันดับต้นๆ ได้แก่ โรคมะเร็ง, โรคหลอดเลือดหัวใจและโรคอื่นๆ เช่น โรคอัลไซเมอร์, โรคพาร์กินสัน, โรคชรา, ฯลฯ ล้วนเนื่องมาจากการที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกายเข้าไปทำลายโมเลกุลที่สำคัญในร่างกาย เช่น ชั้นไขมันในเซลล์เมมเบรน, โพรตีนในเนื้อเยื่อ, เอนไซม์ รวมไปถึงดีเอ็นเอ, ทำให้เกิดพยาธิสภาพในร่างกาย และนำมาซึ่งโรคต่างๆ ดังกล่าว. โดยปกติร่างกายมีกลไกควบคุมอนุมูลอิสระให้อยู่ในระดับที่พอเหมาะด้วยเอนไซม์ ได้แก่ Superoxide dismutase และ Peroxidases เป็นต้น. แต่ปัจจุบันคนเราอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีมลพิษต่างๆ และมีความเครียดเพิ่มมากขึ้น, ทำให้ร่างกายไม่สามารถควบคุมอนุมูลอิสระเหล่านี้ให้อยู่ในระดับที่พอเหมาะได้ จึงทำให้เกิดเป็นโรคต่างๆ.

อนุมูลอิสระ หมายถึง สารใดๆ ที่มีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่ (Unpaired electron) มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งอิเล็กตรอนในวงโคจรของโมเลกุล. อนุมูลอิสระสามารถอยู่เป็นอิสระได้ ซึ่งอาจเป็นระยะสั้นหรือยาว โดยที่มีอิเล็กตรอนรอบนอกสุดเป็นจำนวนคี่, ซึ่งไม่ได้มีส่วนร่วมในการเกิดพันธะระหว่างอะตอมที่อยู่ภายในโมเลกุลนั้น จึงเรียกว่าเป็นอิสระ. อนุมูลอิสระเกิดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชัน ที่มีการย้ายอิเล็กตรอน หรือเมื่อมีการแตกของพันธะโควาเลนต์ แล้วมีอิเล็กตรอนเดี่ยว (Unpaired electron). สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอนุมูลอิสระปกติจะใช้สัญลักษณ์ R แสดงถึงอนุมูลอิสระที่ไม่เจาะจง. โดยทั่วไป อนุมูลอิสระมีทั้งที่เป็นอนุมูลที่มีประจุบวก เรียกว่า อนุมูลแคตไอออน (Cation radical) ใช้สัญลักษณ์ ($R^{+\cdot}$), อนุมูลประจุลบ เรียกว่า อนุมูลแอนไอออน (Anion radical) ใช้สัญลักษณ์ ($R^{\cdot-}$) เช่น อนุมูล Superoxide ($O_2^{\cdot-}$). ส่วนอนุมูลที่มีประจุเป็นกลาง (Neutral radical) ใช้สัญลักษณ์ (R^{\cdot}) เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}), อนุมูล Alkoxy ($C_n H_{n+1} O^{\cdot}$) ฯลฯ เป็นต้น Roberfroid and Calderon (1995).

อนุมูลอิสระส่วนใหญ่เป็นสารไม่เสถียร มีช่วงครึ่งอายุ (Half life) สั้น โดยทั่วไปอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่อยู่ข้างเคียง และโดยวิธีการเพิ่มโมเลกุลของออกซิเจนเข้าไปเพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกซิล (Peroxy radical).

อนุมูลอิสระจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยามาก เนื่องจาก มีอิเล็กตรอนที่พร้อมจะเข้าจับคู่ให้เกิดปฏิกิริยา, ไม่ว่าจะรับอิเล็กตรอนจากตัวให้อิเล็กตรอนหรือให้อิเล็กตรอนกับตัวรับอิเล็กตรอน. เมื่ออนุมูลอิสระตัวหนึ่งเกิดปฏิกิริยากับสารที่ไม่ใช่อนุมูลอิสระ (Non-radical) จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นลูกโซ่, จนกว่าอนุมูลอิสระ 2 ตัวคู่กันได้.

เนื่องจากอนุมูลอิสระมีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่อยู่ในโมเลกุล จึงมีความไวสูงในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารในร่างกาย, โดยทำลายองค์ประกอบหลักของเซลล์ เช่น ทำลายหน้าที่ของเซลล์เมมเบรน จึงทำให้เซลล์ตาย, ทำลายดีเอ็นเอ โดยไปจับคู่กับหมู่ฟอสเฟตและน้ำตาลดีออกซีไรโบส. อนุมูลอิสระสามารถแตกพันธะเปปไทด์ของโปรตีน ทำให้โปรตีนไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ, จึงเป็นสาเหตุของการเกิดการกลายพันธุ์ และการเกิดมะเร็ง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคอื่นๆ ได้ เช่น โรคหัวใจ, โรคไขมันอุดตันในเลือด, โรคไขข้ออักเสบ, โรคมุมิแพ้ และโรคต่อกระจก, เป็นต้น.

แหล่งที่มาของอนุมูลอิสระ มีที่มาจากแหล่งภายนอกในร่างกาย เช่น สภาพแวดล้อม ได้แก่ มลพิษในอากาศ, โอโซน, ไนตรัสออกไซด์, ไนโตรเจนไดออกไซด์, ควันทูริ, ฝุ่นละออง, เป็นต้น. อาหารที่มีไขมันไม่อิ่มตัว หรือธาตุเหล็กมากกว่าปกติ, แสงแดด, ความร้อน, รังสีแกมมา, ยาบางชนิด, เป็นต้น. แหล่งภายในร่างกาย ได้แก่ ออกซิเจน เป็นต้น.

1.5.2 การเกิดอนุมูลอิสระในร่างกาย

อนุมูลอิสระในร่างกาย เกิดจากการที่เราหายใจเอาออกซิเจนเข้าไปเผาผลาญสารอาหารในร่างกายตลอดเวลา ทำให้มีออกซิเจนจำนวนมากในกระแสเลือด, ในของเหลวต่างๆ ในร่างกายและเซลล์. การเผาผลาญสารอาหารจะให้พลังงานใช้ในการดำรงชีวิต, โดยการดึงเอาไฮโดรเจนออกจากสารอาหาร และส่งทอดอิเล็กตรอนไปตามตัวรับอิเล็กตรอนในห่วงโซ่ขนส่งอิเล็กตรอน ที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อภายในของไมโทครอนเทรีย ไปจนถึงอะตอมของออกซิเจนหนึ่งอะตอม เป็นตัวสุดท้ายได้โมเลกุลของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกขับออกจากร่างกายทางลมหายใจออก. มีรายงานการวิจัยพบว่า ประมาณร้อยละ 2 ของออกซิเจนที่ใช้ในไมโทครอนเทรียจะถูกเปลี่ยนไปเป็น Superoxide. นั่นคือ ออกซิเจนที่หายใจเข้าไปทำให้เกิดอนุมูลของออกซิเจนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจำนวนมาก อยู่ในรูปของอนุมูลอิสระ (ROS = Reactive oxygen species) ซึ่งมีทั้งประโยชน์และโทษ. ในส่วนที่เป็นประโยชน์ คือ อนุมูลอิสระที่เซลล์เม็ดเลือดขาว พวก Macrophage และ Neutrophil สร้างขึ้นเพื่อทำลายแบคทีเรียที่บุกรุกเข้าไปในร่างกาย เช่น NO (Nitric oxide), Hydroxyl free radical และ Superoxide anion. แต่อนุมูลอิสระพวกนี้ ยังทำลายอย่างอื่น รวมทั้งเซลล์ที่แข็งแรงด้วย. ดังนั้น ร่างกายจะต้องมีกลไกควบคุมระดับของ ROS ให้มีการสลายอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ในอัตราที่ทำให้ปริมาณอนุมูลอิสระในร่างกายอยู่ในระดับต่ำ. แต่ถ้าหากร่างกายเกิด Oxidation stress จะทำให้มีการสร้างอนุมูลอิสระในเนื้อเยื่อมากขึ้นไป เช่น ในสภาวะที่ได้รับสารพิษ, การสูบบุหรี่หรือได้รับควันทูริหรือควันทูริ, ได้รับเชื้อโรคเข้าสู่ร่างกาย. อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจำนวนมากจะไปทำลายโมเลกุลที่สำคัญ เช่น โปรตีนและไขมัน. โดยเกิด

กระบวนการที่เกิดผลเสียต่อร่างกาย เช่น เปอร์ออกซิเดชันของไขมัน (Lipid peroxidation), โดยเฉพาะกับโมเลกุล LDL-C ซึ่งเป็นไลโปโปรตีน ที่ทำหน้าที่หลักในการพาคอเลสเตอรอลและกรดไขมันบางส่วนไปในกระแสเลือด. LDL-C นี้มีความไวต่อออกซิเดชันมาก เนื่องจากมีปริมาณไขมันชนิดไม่อิ่มตัวอยู่ในปริมาณมากพอสมควร, จึงเกิดโมเลกุลของ Oxidized LDL หรือกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของดีเอ็นเอและโปรตีนผิดปกติไป. ในภาวะที่มีอนุมูลอิสระต่างๆ ได้แก่ อนุมูลไนตริกออกไซด์ (NO, N=O:), อนุมูลไฮโดรเปอร์ออกซิล (Hydroperoxyl radicals; HOO[·]), Superoxide anion O₂^{·-}, และ Singlet oxygen (ทั้งหมดรวมเรียกว่า ROS). หากระบบป้องกันของร่างกายที่จะไปสลายอนุมูลอิสระเกิดบกพร่อง จะก่อให้เกิดอันตรายต่อเซลล์และเกิดโรคต่างๆ ได้มากมายแทบทุกระบบในร่างกาย.

ปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ (Basu *et al.* 1999)

ปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ดังนี้ :

1. ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation step) เป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระในเซลล์ มักเกิดจากปฏิกิริยาหลายด้วยน้ำ (Hydrolysis), แสง (Photolysis), รังสี (Radiolysis) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction). นอกจากนี้ ยังมีเอนไซม์อื่นๆ อีกหลายชนิด รวมทั้งโมเลกุลที่มีความไวสูงในการทำปฏิกิริยา เช่น Nitric oxide (NO) และออกซิเจนในสภาวะที่ถูกกระตุ้น (Excited state) ที่เรียกว่า Singlet oxygen (¹O₂) ปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระแสดงดังสมการ.



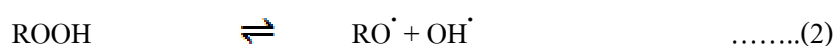
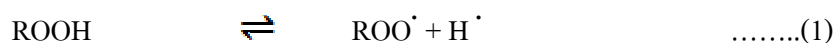
เมื่อ Singlet oxygen ทำปฏิกิริยากับไขมันจะทำให้เกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ,



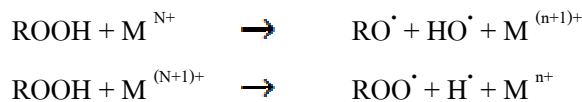
ไฮโดรเปอร์ออกไซด์อาจเกิดจากปฏิกิริยาของออกซิเจนในสภาวะพื้น (Ground state) ที่เรียกว่า Triplet oxygen (³O₂), เมื่อมีเอนไซม์ Lipoxygenase อยู่ด้วยดังสมการ,



พันธะ O - O ในโมเลกุลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะที่อ่อน จึงสลายตัวได้ง่ายทำให้เกิดอนุมูลอิสระ, ดังสมการ,



ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วถ้ามีโลหะไอออน เช่น เหล็กและทองแดง, จะช่วยทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากยิ่งขึ้น, ดังสมการ,



2. ขั้นตอนพวพาเกชัน (Propagation step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นตอนแรกจะดำเนินต่อไปโดยเกิดปฏิกิริยาขึ้น 2 แบบทำให้ได้อนุมูลอิสระตัวใหม่ ดังนี้ :

2.1.1 การดึงเอาอะตอมไฮโดรเจนจากโมเลกุลใกล้เคียง



2.1.2 การทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจนที่อยู่ในสถานะพื้น



3. ขั้นตอนเทอร์มิเนชัน (Termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น 2 อนุมูลมารวมกันได้เป็นสารที่มีความเสถียร ปฏิกิริยาถูกใช้จะสิ้นสุดลง, ดังสมการ.



1.5.3 การเกิดอนุมูลอิสระที่ได้รับจากแหล่งภายนอกร่างกาย

อนุมูลอิสระนอกจากจะเกิดขึ้นเองในร่างกายแล้วยังมีตามแหล่งภายนอกร่างกาย ซึ่ง ได้แก่ :

1. อนุมูลอิสระที่มีในอาหาร

1) อาหารปิ้งย่าง ทอด ที่เกรียมจัด, อาหารที่ทอดในน้ำมันที่ใช้ซ้ำบ่อยๆ, เป็นแหล่งอุดมด้วยอนุมูลอิสระ. การที่มีน้ำมันถูกไฟหลายครั้งจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น ดังนั้นการใช้ น้ำมันที่ดีควรใช้ครั้งเดียว.

2) อาหารที่ปนเปื้อนสารเคมี เช่น การปนเปื้อนสารไดออกซิล. กลุ่มที่จะเป็นได้ง่ายคือ พืชผักที่ใช้ยาฆ่าแมลงเกินขนาด, เป็อนยาฆ่าหญ้า, ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นสารก่อมะเร็งทั้งสิ้น. ดังนั้น ควรรับประทานผลไม้ที่ปลูกแบบอินทรีย์ ไม่ใช้ยาฆ่าแมลง, ไม่ใช้สารเคมีเร่งดอกเร่งผล, ใช้การปลูกแบบธรรมชาติจะปลอดภัยกว่า.

3) อาหารสำเร็จรูปที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะมีสารกันบูด กันเชื้อรา, เพื่อให้มีอายุอยู่ได้นาน. นอกจากนี้ กลุ่มอาหารผสมสี ซึ่งเป็นสารเคมีก็เป็นแหล่งของอนุมูลอิสระ เช่น สีเหลืองผสมเนย, สีแดงเบอร์สอง, เป็นต้น.

2. อนุมูลอิสระในอากาศ คนที่อยู่ในเมืองใหญ่มักจะอยู่ท่ามกลางมลภาวะอันเป็นแหล่งที่มาของอนุมูลอิสระๆ จากอากาศจะมาจากแหล่งต่อไปนี้ :

1) คิวบิก คิวบิก ฟุตที่พ่นออกมาจากโรงงาน ล้วนเป็นอนุมูลอิสระ เช่นเดียวกับคิวบิก ฟุตธรรมดา แต่คิวบิก ฟุตจากโรงงานมักมีมากกว่า.

2) ท่อไอเสีย ที่พ่นออกจากรถยนต์ก็เป็นแหล่งของอนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระในท้องถนนเป็นตัวการที่ทำลายเนื้อเยื่อในโพรงจมูก, หลอดลม และเยื่อตาจนเกิดการอักเสบ.

3) คิวบิก ฟุต การดูดคิวบิก ฟุตเข้าไปสู่อากาศหนึ่งจะเท่ากับได้อนุมูลอิสระไปทำลายหลอดลมของตนเองมากถึง 10^{17} ตัว ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น NO และจะกลายไปเป็น NO_2 . สำหรับคนที่ไม่สูบบุหรี่ แต่อยู่ในบรรยากาศที่มีคิวบิก ฟุต จะดูดเอาอนุมูลอิสระเข้าไปด้วยเช่นกัน มีโอกาสจะเกิดโรคต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วได้เท่าเทียมกัน.

4) มลภาวะอื่นๆ ในเมืองใหญ่ เช่น ฝุ่นซีเมนต์จากการก่อสร้างอาคาร หรือสิ่งก่อสร้างอื่นๆ.

1.5.4 สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) (เนาวรัตน์วัฒนาและบุญศิริ 2542)

สารต้านอนุมูลอิสระ คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่ต่อต้านหรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน, รวมถึงสารที่สามารถยับยั้งและควบคุมอนุมูลอิสระไม่ให้ทำลายองค์ประกอบของเซลล์. สารต้านอนุมูลอิสระมี 2 ประเภท ได้แก่ :

1. สารสังเคราะห์ (Synthetic antioxidant) ได้แก่ Ter-butyl-4-hydroxyanisole (BHA), Ter-butyl-4-hydroxytoluene (BHT) และ Tert-butyl-hydroquinone (TBHQ) ซึ่งสารเหล่านี้ใช้เป็นสารกันหืนในอาหาร.

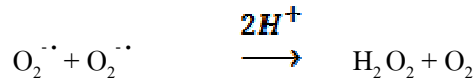
2. สารจากธรรมชาติ (Natural antioxidant) เช่น Amino acid, Ascorbic acid, Carotenoid, Flavonoid, Tannin, Tocopherol, ฯลฯ.

สารต้านอนุมูลอิสระ แบ่งเป็น 2 ประเภท ตามแหล่งที่เกิด ดังนี้ :

1. สารต้านอนุมูลอิสระที่สร้างขึ้นภายในร่างกาย

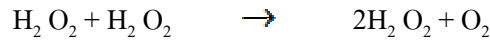
ได้แก่ เอนไซม์ ที่ร่างกายของเราสร้างขึ้น เพื่อหยุดยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ให้อนุมูลอิสระทำอันตรายเซลล์ร่างกายได้แก่ เอนไซม์ดังต่อไปนี้.

1) Superoxide dismutase หรือ SOD เอนไซม์ชนิดนี้พบในไมโทคอนเดรีย, ทำหน้าที่เปลี่ยนอนุมูลอิสระให้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับออกซิเจน. พบเอนไซม์นี้ในอาหารด้วย ได้แก่ ในเมล็ดที่กำลังงอก เช่น ถั่วงอก, ถั่วงอกหัวโต, เป็นต้น.



Superoxide dismutase

2) Catalase เป็นเอนไซม์ที่สามารถทำลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นน้ำ.



Catalase

3) Peroxidases เป็นเอนไซม์ที่ทำลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ตัวรีดิวซ์



Peroxidases

4) Glutathione peroxidase เอนไซม์ตัวนี้จะทำงานร่วมกับเซเลเนียม (Selenium) เพื่อสะเทินอนุมูลอิสระ, โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเลนส์ตา โดยสลาย Hydrogen peroxidase และ peroxidases อื่นๆ ที่เกิดขึ้นกับไขมันต่างๆ ในร่างกาย และจะชะลอการเกิดของคออกระกได้ หากกินพืชตระกูลกระหล่ำ ได้แก่ กระหล่ำปลี, กระหล่ำดอก, กระหล่ำม่วง, กระหล่ำรูปหัวใจ, กระหล่ำไบหยิก, บร็อคโคลี, ร่างกายจะสร้างเอนไซม์ตัวนี้ได้มากขึ้น. แต่ต้องระวัง เนื่องจาก เซเลเนียมเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง หากกินมากเกินไปจะเกิดพิษได้สูง.

2. สารต้านอนุมูลอิสระที่ร่างกายได้รับจากอาหาร

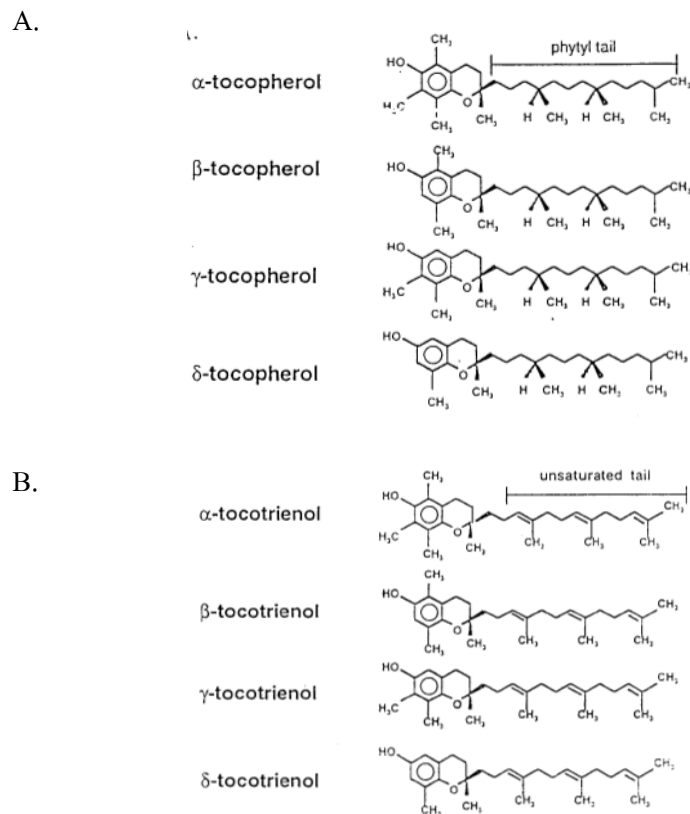
สารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นสารอาหารที่รู้จักกันดีและเป็นที่ยอมรับ ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นวิตามินที่มีในอาหารที่สำคัญๆ ได้แก่ บีตา-แคโรทีน, วิตามินเอ, วิตามินซี, วิตามินอี, ที่พบได้ในอาหารที่บริโภคทั่วไป โดยเฉพาะพืช และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพืช.

สารต้านอนุมูลอิสระบางชนิด

1. วิตามินซี มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว, ไม่มีกลิ่น, มีรสเปรี้ยว, ละลายน้ำได้, มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid). วิตามินซีเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญชนิดหนึ่งในกระบวนการเมแทบอลิซึมในร่างกาย โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, อนุมูล Hydroxyl, อนุมูล Peroxyl และ Singlet oxygen, ได้สารที่เรียกว่า Semihydroascorbic acid ($A^{\cdot\cdot}$) และ Dehydro ascorbate (A) (Basu *et al.* 1999).

นอกจากนี้ วิตามินซียังทำหน้าที่เป็นตัวส่งเสริมประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระของวิตามินอีด้วย โดยทำให้อนุมูล α -tocopherol (TO^{\cdot}) เปลี่ยนกลับไปเป็น α -tocopherol (TOH) ดั้งเดิม (Packer *et al.* 1996).

2. วิตามินอี (Tocopherol) วิตามินอี เป็นวิตามินที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดๆ ละลายในไขมัน. ในธรรมชาติวิตามินอีมีหลายชนิด ปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ โทโคฟีรอล (Tocopherol) และ โทโคโทรีนอล (Tocotrienol), แต่ละกลุ่มยังแยกออกเป็นวิตามินย่อยๆ อีก 4 ชนิด, ชื่อและสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 1.



รูปที่ 1. สูตรโครงสร้างของวิตามินอี โทโคฟีรอล (A) และโทโคโทรีนอล (B).

วิตามินอีทำหน้าที่ให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูล Peroxyl เกิดเป็นอนุมูล α-tocopherol ซึ่งอนุมูลนี้ จะทำปฏิกิริยากับอนุมูล Peroxyl ตัวอื่นๆทำให้ได้สารที่มีความเสถียรเป็นผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันหยุดลง (Basu *et al.* 1999).

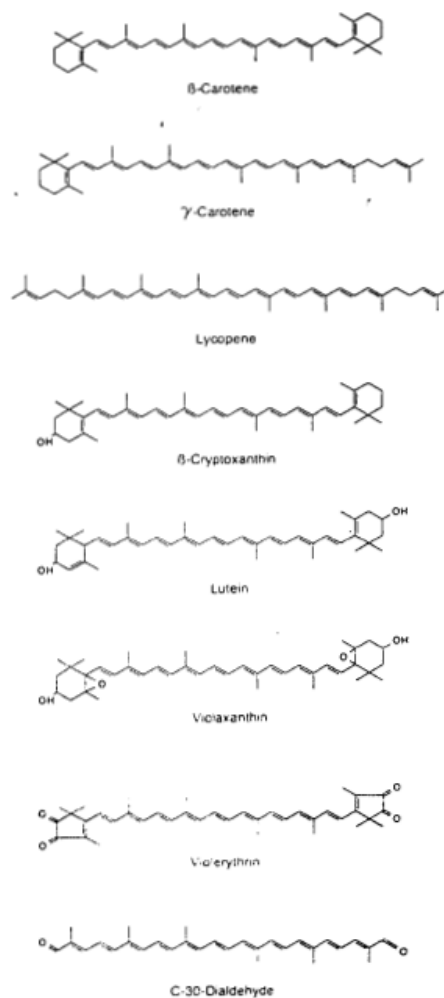
3. แคโรทีนอยด์ เป็นรงควัตถุที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ, มีบทบาทในการสังเคราะห์แสง เช่นเดียวกับคลอโรฟิลล์ โดยทำหน้าที่ช่วยคลอโรฟิลล์ในการรับพลังงานแสง. แคโรทีนอยด์จะอยู่ในส่วนของคลอโรพลาสต์. ผลไม้ที่สุกจะมีแคโรทีนอยด์มากกว่าผลไม้ที่ยังดิบ. แคโรทีนอยด์แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามองค์ประกอบของโครงสร้างในโมเลกุล ดังนี้ (Packer *et al.* 1996).

1) แคโรทีน (Carotene) เป็นแคโรทีนอยด์ที่โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้น เช่น บีตา-แคโรทีน, อัลฟา-แคโรทีน, แกมมา-แคโรทีน และ ไลโคปีน (Lycopene).

2) ออกโซแคโรทีนอยด์ (Oxocarotenoid) หรือแซนโทฟิลล์ (Xanthophyll) เป็นแคโรทีนอยด์ที่โครงสร้างโมเลกุลบริเวณวงแหวน ประกอบด้วยกลุ่มอื่นนอกเหนือจากคาร์บอนและไฮโดรเจน

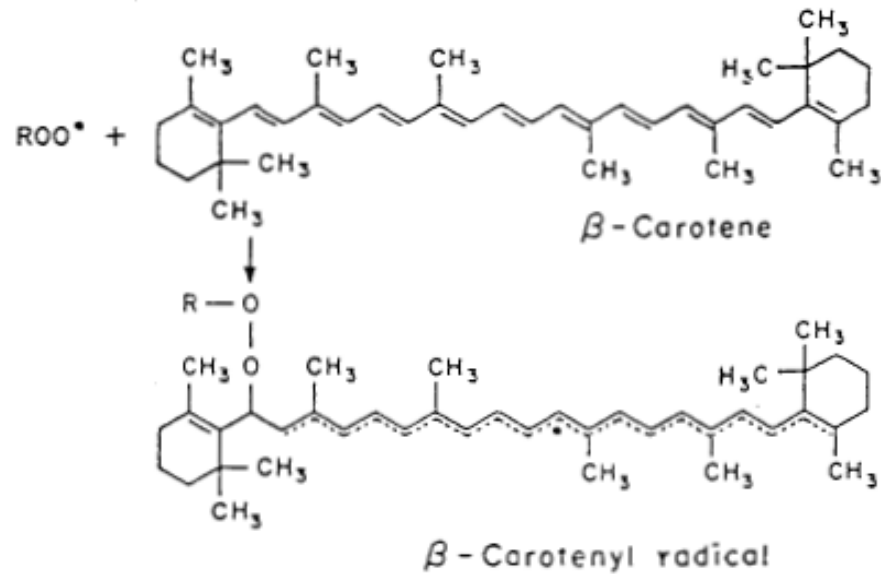
แคโรทีนอยด์ โดยเฉพาะบีตา-แคโรทีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด Singlet oxygen จึงป้องกันการเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในสภาวะที่มี Singlet oxygen.

สูตรโครงสร้างของแคโรทีนอยด์ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. สูตรโครงสร้างของแคโรทีนอยด์บางชนิด.

บีตา-แคโรทีน สามารถดักจับอนุมูลอิสระไว้ในโมเลกุล และเกิดเรโซแนนซ์ที่มีความเสถียร ดังรูปที่ 3 (สุขวิถิ 2544).

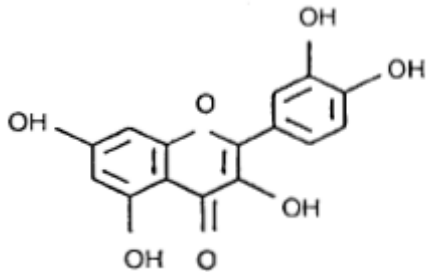


รูปที่ 3. สูตรโครงสร้างเรโซแนนซ์ของโมเลกุล บีตา-แคโรทีน.

สารประกอบฟีนอลิก เป็นสารที่พบในพืชทั่วไป มีสูตรโครงสร้างเป็นวงแหวนแอโรเมติก (Aromatic ring) ที่มีจำนวนหมู่ Hydroxyl หนึ่งหมู่หรือมากกว่าในโมเลกุลส่วนใหญ่. สารประกอบฟีนอลิก มักจะพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (Glycoside), สารประกอบฟีนอลิกสามารถละลายได้ในน้ำ.

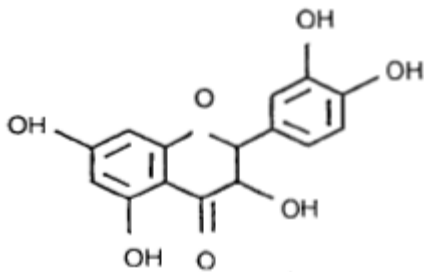
สารประกอบฟีนอลิกที่พบในธรรมชาติมีหลายกลุ่มที่พบคือ สารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoid). นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบอื่นๆ เช่น Simple monocyclic phenol, Phenyl propanoid, Phenolic quinone และ Polyphenolic ซึ่งได้แก่ Lignin melanin และ Tannin เป็นต้น. นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบที่มีกลุ่มฟีนอล (Phenol unit) รวมอยู่ในโมเลกุลของโปรตีน, อัลคาลอยด์ (Alkaloid) และเทอร์พีนอยด์ (Terpenoid).

สารประกอบฟีนอลิกหลายชนิดมีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเช่น ฟลาโวนอยด์, กรดฟีนอลิก และแทนนิน. สารประกอบฟีนอลิกทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ ซึ่งเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และกำจัดออกซิเจนที่อยู่ในรูปแอกทีฟ, มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 4.



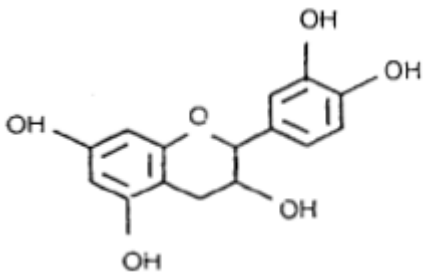
A : Flavone / Flavonol

- quercetin = OH : 3, 5, 7, 3', 4'
- kaempferol = OH : 3, 5, 7, 4'
- luteolin = OH : 5, 7, 3', 4'
- apigenin = OH : 5, 7, 4'
- chrysin = OH : 5, 7



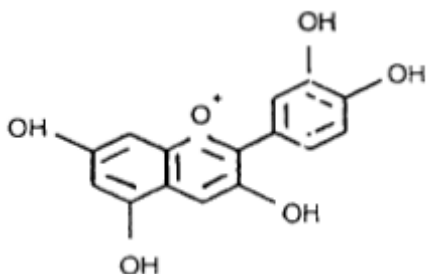
B : Flavanone / Flavanonol

- taxifolin = OH : 3, 5, 7, 3', 4'
- nangenin = OH : 5, 7, 4'



C : Flavanol

- catechin = OH : 3, 5, 7, 3', 4'



D : Anthocyanidin

- cyaniding = OH : 3, 5, 7, 3', 4'
- delphinidin = OH : 3, 5, 7, 3', 4', 5'

รูปที่ 4. สูตรโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกบางชนิด.

1.5.5 การวัดสีในการสกัด (หาญสืบสาย ม.ป.ป.)

สีเป็นเรื่องของการรับรู้และแปลความหมายของเฉพาะบุคคล, การมองดูวัตถุขึ้นเดียวกัน เช่น ผลแอปเปิล, แต่คนที่มองจะอธิบายสีตามสิ่งที่ใช้อ้างอิงและประสบการณ์ที่แตกต่างกัน, ทำให้แต่ละคนอธิบายสีออกมาด้วยถ้อยคำที่แตกต่างกันอย่างไม่มีความจำกัด. เนื่องจากมีวิธีการอธิบายสีต่างๆ อยู่มากมาย, การเจาะจงระบุสีให้แก่ใครจึงเป็นสิ่งที่ยากและยังคลุมเครืออยู่. ถ้าบอกสีของแอปเปิลแก่ใครก็ตามว่าเป็นสีแดงไหม้, เราคาดหวังได้หรือไม่ว่า เขาจะผลิตสีเหมือนที่เราต้องการได้. จะเห็นได้ว่า การสื่อสารเรื่องสีด้วยคำพูดเป็นเรื่องที่ซับซ้อนและยุ่งยากมาก. ดังนั้น จึงมีวิธีมาตรฐานที่สามารถบอกสีต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและสามารถเข้าใจตรงกันทุกๆ คนได้.

การเรียกชื่อสีต่างๆ ไป และการเรียกชื่อสีอย่างเป็นระบบ

คำที่ใช้บอกสีมักจะเปลี่ยนไปตลอดเวลา ตัวอย่างเช่น สีแดง. บางคนเรียกว่า สีแดงชาด, สีแดงเข้ม, สีแดงเลือดนก, สีแดงกุหลาบ, สีแดงสตอร์เบอร์รี่, สีแดงสักหลาด, เป็นต้น. ถ้าวิเคราะห์เงื่อนไขสีและเพิ่มคำอธิบายลักษณะสีลงไป เช่น คำว่า สว่าง (Bright), ทึบ (Dull), เข้ม (Deep), ทำให้สามารถจะบ่งบอกสีได้ชัดเจนยิ่งขึ้น, เช่น สีแดงสด เป็นการเรียกชื่อสีอย่างเป็นระบบ ถึงแม้จะมีแนวทางในการอธิบายสีที่หลากหลายมากขึ้น, แต่คนที่ได้ยินคำว่า สีแดงเลือดนกและสีแดงสด, ยังแปลความหมายไปแตกต่างกัน. ดังนั้น การบอกสีด้วยคำเรียกชื่อสี ยังไม่เพียงพอที่จะสร้างความหมายที่ชัดเจนได้.

สถานะต่างๆ ที่มีผลต่อการปรากฏของสี

แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น ผลแอปเปิลเมื่อมองภายใต้แสงอาทิตย์ที่หน้าร้านขายของชำดูน่ารับประทาน, แต่เมื่อมองภายใต้หลอดฟลูออเรสเซนต์ กลับดูไม่น่ารับประทาน. พบว่า แสงจากดวงอาทิตย์, หลอดฟลูออเรสเซนต์, หลอดทังสเตน, และอื่นๆ แต่ละชนิดจะทำให้ลูกแอปเปิลผลเดียวกันมองดูต่างกันได้.

ฉากด้านหลังที่ต่างกัน (Background), ถ้านำผลแอปเปิลไปวางบนฉากด้านหลังสว่าง, ผลแอปเปิลจะดูสีที่ทึบกว่าวางบนฉากด้านหลังที่เป็นสีมืด. นี่ก็คือ ผลที่เกิดจากความเปรียบต่างของสีฉากหลัง (Contrast effect) และทำให้การพิจารณาสีไม่มีความแน่นอน.

ผู้สังเกตคนละคนกัน ความไวของสายตาแต่ละคนมีความแตกต่างกันเล็กน้อยแม้กระทั่ง ในคนสายตาปกติ เมื่อมองสียังมีปัญหาแยกความแตกต่างระหว่างสีแดงหรือสีน้ำเงิน. นอกจากนี้ความสามารถในการรับรู้สี จะเปลี่ยนแปลงไปตามอายุด้วยปัจจัยทั้งหลายดังกล่าว ทำให้ผู้สังเกตแต่ละคนมองเห็นสีได้ต่างกัน.

ทิศทางในการมองที่ต่างกัน เมื่อมองไปที่รถยนต์จากมุมที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เห็นที่จุดใดจุดหนึ่งมีความสว่างขึ้นหรือมืดลงได้ ซึ่งเป็นผลมาจากทิศทางการรับแสงของสีรถยนต์, โดยเฉพาะสารให้สีประเภทผงสีโลหะ จะมีความไวต่อทิศทางการรับแสงสูงมาก. ดังนั้น มุมที่ใช้สังเกตวัตถุและมุมของแหล่งกำเนิดแสงจะต้องคงที่ เพื่อให้การสื่อสารเรื่องสีมีความถูกต้อง.

ขนาดที่ต่างกันหลังจากตัดสินใจเลือกวอลล์เปเปอร์จากตัวอย่างชิ้นเล็กๆ ซึ่งเห็นว่าสวยถูกใจ แต่เมื่อนำไปติดที่ฝาผนังจริงกลับดูสว่างเกินไป. พบว่า สีที่อยู่บนพื้นขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะสว่างและสดกว่าสีเดียวกันที่อยู่บนพื้นที่เล็ก. นี่เป็นผลจากพื้นที่ (Area effect). การเลือกวัตถุ โดยนำตัวอย่างสีเทียบกับวัตถุที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ อาจได้ผลที่คลาดเคลื่อนได้หากนำไปเทียบกับวัตถุที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก.

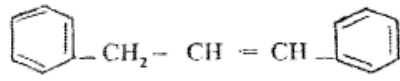
การที่พืชให้สีแตกต่างกัน ก็เนื่องจากในพืชมีสารให้สีต่างกัน (บุญสนิท ม.ป.ป.), ได้แก่สารประกอบดังต่อไปนี้ :

1) สารฟลาโวนอยด์ มีสีเหลือง ถึงส้ม-เหลือง เช่น ลูทีโอลิน (Lutiolin) จากต้นเวลด์ (Weld) ให้สีเหลือง, เคอร์เซทิน (Quercetin) จากเปลือกหอมหัวใหญ่ให้สีเหลืองเข้ม, มอร์ริน (Morin) จากแก่นขนุน ให้สีเหลืองเข้ม และคาร์ทามิน (Carthamin) จากดอกคำฝอยให้สีเหลืองปนน้ำตาล, ดังรูปที่ 5.

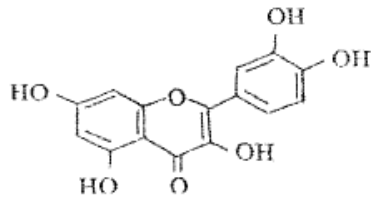
2) สารเทอร์ปีนอยด์ หรือไอโซปีนอยด์ (Terpenoid หรือ Isopenoid) สารในกลุ่มนี้เป็นสารที่มีชีวสังเคราะห์มาจากหน่วยไอโซเพนเทน (Isopentane unit, C_5) เช่น โครเซทิน (Crocetin) จากหญ้าฝรั่ง (Saffron) มีสีเหลือง, บิซิน (Bixin) จากเมล็ดคำแสดให้สีส้ม-แดง. สารในกลุ่มนี้จะมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวมาก (Conjugated double-bond), ดังรูปที่ 6.

3) สารแอนทราควิโนนและแนพทาควิโนน (Anthraquinone and Naphthaquinone) สารในกลุ่มนี้มักจะให้สีแดง.

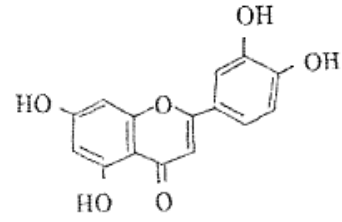
4) สารแอลคาลอยด์ (Alkaloid) สารในกลุ่มนี้มักจะได้จากพืชชั้นสูง และจะมีไนโตรเจนอะตอมอยู่ในโมเลกุลด้วย.



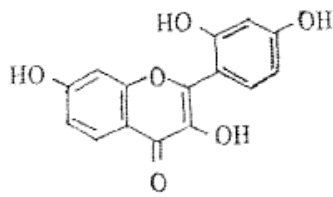
Flavonoid Structure



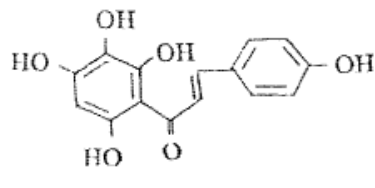
Luteolin



Quercetin

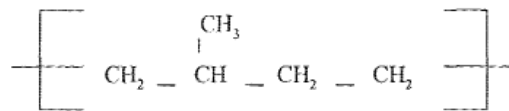


Morin

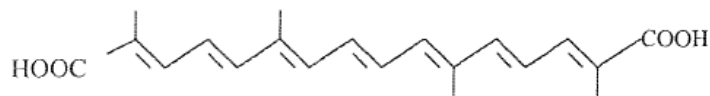


Carthamin

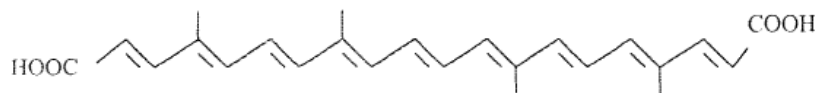
รูปที่ 5. โครงสร้างทางเคมีของสารให้สีฟลาโวนอยด์.



Isopentane Unit

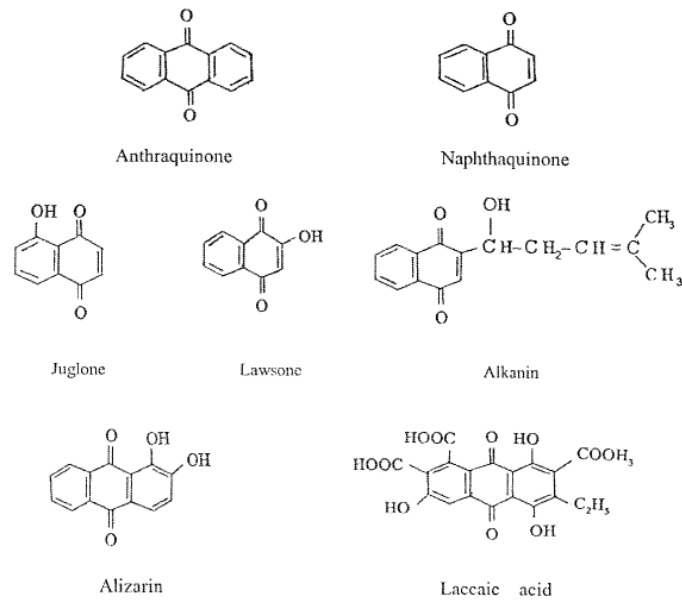


Crocetin

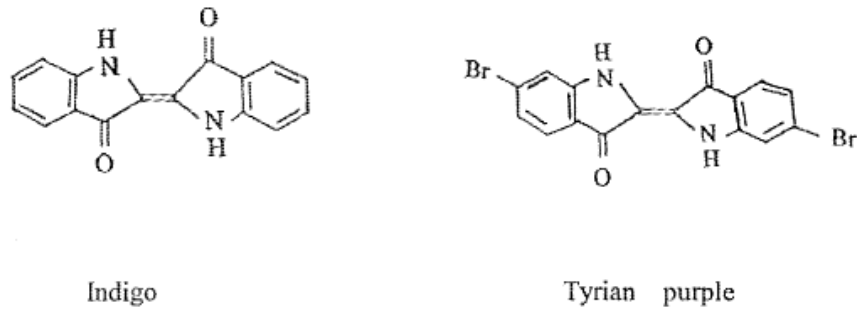


Bixin

รูปที่ 6. โครงสร้างทางเคมีของสารให้สีพวกเทอร์ปีนอยด์.



รูปที่ 7. โครงสร้างทางเคมีของสารให้สีพวกแอนทราควิโนนและแนพทาควิโนน.



รูปที่ 8. โครงสร้างทางเคมีของสารที่ให้สีพวกแอลคาลอยด์.

1.5.6 การแสดงค่าสีในเชิงตัวเลข

ในอดีตมีคนมากมายได้ประดิษฐ์คิดค้นวิธีการในการจำแนกสี แต่ส่วนใหญ่มักใช้สูตรที่ซับซ้อนในการอธิบายสีและระบุนออกมาเป็นค่าตัวเลข โดยมุ่งหวังให้ทุกๆ คนสามารถสื่อสารในเรื่องสีกันได้ง่ายขึ้นและแม่นยำ. วิธีเหล่านี้ต่างพยายามหาทางที่จะอธิบายสีเป็นค่าตัวเลข เช่นเดียวกับการบอกระยะทางหรือน้ำหนัก, เช่น ในปี ค.ศ. 1905 ศิลปินชาวอเมริกา เอ.เอช. มันเชลล์ ได้คิดค้นวิธีการบอกสีโดยนำแผ่นกระดาษสีจำนวนมาก แบ่งเป็นสีสัน (Munsell hue), ความสว่าง (Munsell value) และความอิ่มตัว (Munsell chroma), เพื่อใช้ดูเปรียบเทียบกับสีตัวอย่าง

(Specimen color). ในเวลาต่อมา หลังจากได้ทำการทดลองเป็นจำนวนมาก ระบบนี้ได้รับการพัฒนา มาเป็น (Munsell Renotation system) ซึ่งใช้กันอยู่ถึงปัจจุบันระบบนี้ สีต่างๆ ถูกแสดงออกมาเป็น ค่าตัวอักษร/ตัวเลขเรียงกัน เช่น (H V/C) โดย H คือ ค่าฮิว (Hue) หมายถึงสีล้วน, V คือค่าความสว่าง (Value) และ C คือ ค่าความอึมตัวหรือโครมา (Chroma) ซึ่งเป็นการประเมินด้วยตา โดยใช้กับ ตารางสีของมันเชลล์ (Munsell color charts). สำหรับระบบอื่นๆ ที่น่าสนใจใช้อธิบายสีในเชิงตัวเลข ได้แก่ ระบบพัฒนาขึ้นโดยองค์กรระหว่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของสีและแสง The Commission International Del' Eclairage (CIE). ที่ได้รับความนิยมแพร่หลายมากที่สุดมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบ Yxy (แสดงตำแหน่งสี Yxy) ซึ่งเริ่มใช้ในปี ค.ศ. 1931, คำนวณจากค่า ไตรศติมุทธ์ XYZ ตามมาตรฐานของ CIE. ระบบ $L^* a^* b^*$ (แสดงตำแหน่งสี $L^* a^* b^*$) เริ่มนำมาใช้ในปี ค.ศ. 1976 ซึ่งทำให้ความแตกต่างของสี มีระยะที่สัมพันธ์ใกล้เคียงกับความแตกต่างที่มองเห็นด้วยตามากขึ้น. ปริภูมิสี (Color space) เหล่านี้ ถูกนำมาใช้สื่อสารในระบบสีของโลกในปัจจุบัน, เป็นขอบเขตแสดงความกว้างของสีของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้เครื่องหมาย (Notation) เช่น ค่าตัวเลข, เป็นต้น.

โดย	L^*	ใช้กำหนดความสว่าง (Lightness) ของสี
		ถ้า L^* มีค่า เท่ากับ 0 หมายถึง สีดำ
		ถ้า L^* มีค่า เท่ากับ 100 หมายถึง สีขาว
	a^*	ใช้กำหนดความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (Redness-Greenness)
		ถ้า a^* มีค่าบวก หมายถึง ความเป็นสีแดง
		ถ้า a^* มีค่าลบ หมายถึง ความเป็นสีเขียว
	b^*	ใช้กำหนดความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (Yellowness-Blueness)
		ถ้า b^* มีค่าบวก หมายถึง ความเป็นสีเหลือง
		ถ้า b^* มีค่าลบ หมายถึง ความเป็นสีน้ำเงิน

นอกจากนี้ ในระบบ ซีแลป (CIE $L^* a^* b^*$) ยังมีค่าเชื่อมค่า a^* และค่า b^* เข้ากับฮิว (Hue) และโครมา (Chroma), โดยกำหนดค่าสี 2 ค่า คือ ฮิวแองเกิล (Hue angle) (h^*) และโครมา (Chroma) (C^*).

ฮิว แองเกิล (Hue angle) เป็นตัวเลขที่ระบุตำแหน่งสี (Color space) มีหน่วยเป็นองศา,

ถ้า	h^*	=	0, (360)	องศา	แสดงว่าเป็นสีแดง,
	h^*	=	90	องศา	แสดงว่าเป็นสีเหลือง,
	h^*	=	180	องศา	แสดงว่าเป็นสีเขียว,
	h^*	=	270	องศา	แสดงว่าเป็นสีน้ำเงิน.

ส่วน โครมา (Chroma) คือ ค่าแสดงความสดสีของสี.

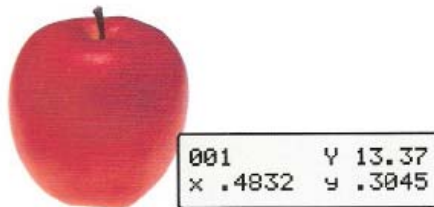
ในการระบุสีของวัตถุมีสีในระบบ ซีแอลพี (CIE L* a* b*) นั้นจะระบุด้วยค่า L*, C* และ h* มากกว่า L*, a* และ b* เนื่องจากจะทำให้เข้าใจและทราบลักษณะของสีได้ใกล้เคียงกับที่ตาของมนุษย์มองเห็น.

1.5.7 ปริภูมิสี (Color space)

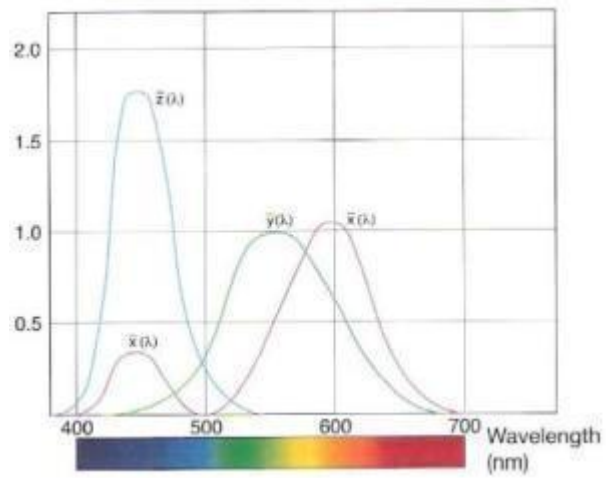
ค่าไตรสตีมูลต์ XYZ และปริภูมิสี Yxy

ค่าไตรสตีมูลต์ XYZ และปริภูมิ Yxy ถือว่าพัฒนามาจากระบบสี CIE ซึ่งมีแนวพื้นฐานมาจากทฤษฎี 3 องค์ประกอบ (Three-component theory) ในการมองเห็น, ได้กล่าวไว้ว่า ตาของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ไวแสงสามสีคือ สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน, และสีทั้งหมดที่เรามองเห็นเกิดจากการกวนของสามสีหลักดังกล่าว.

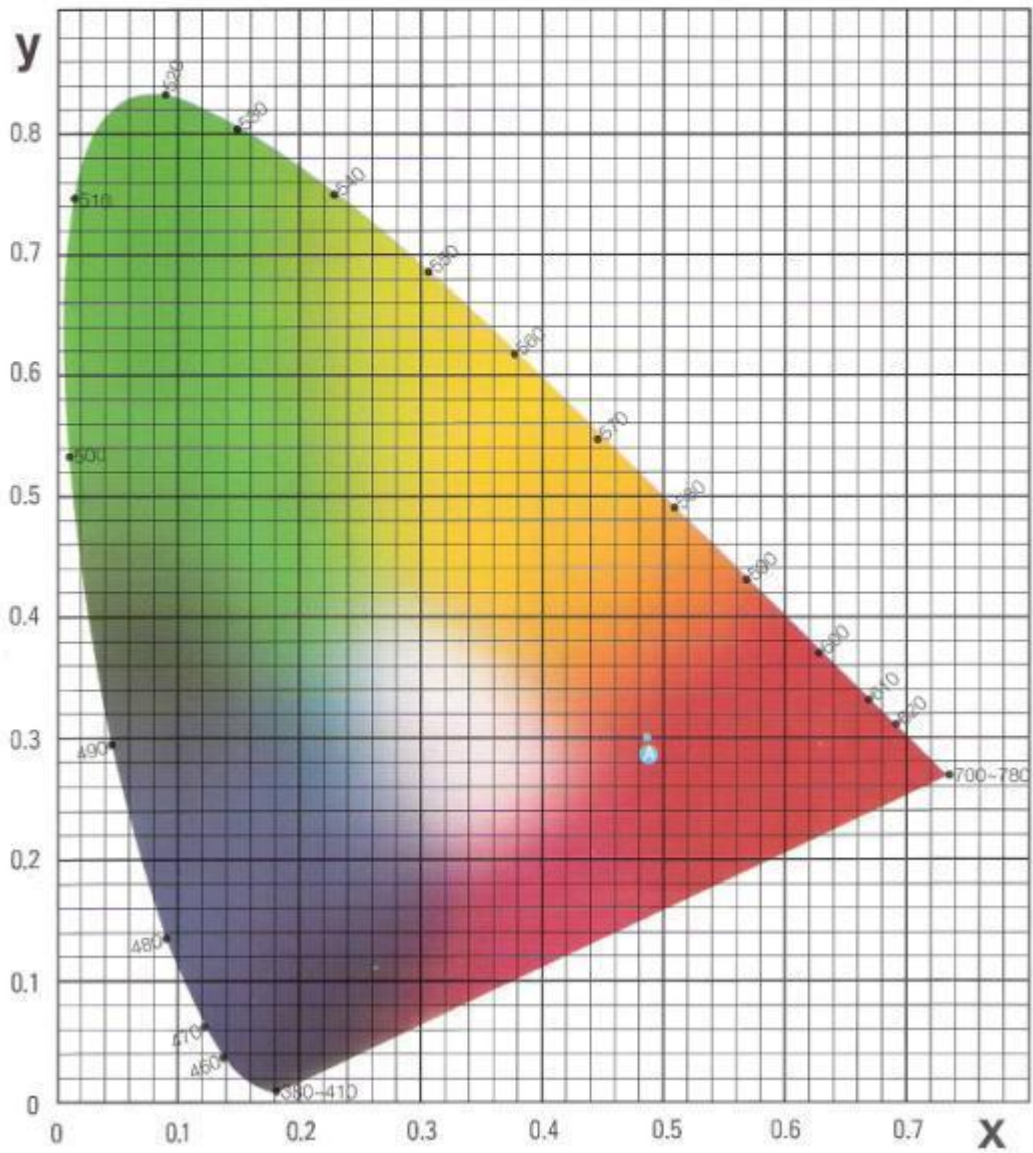
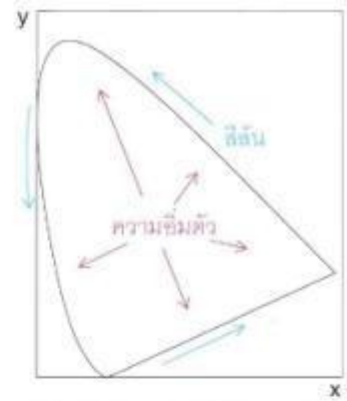
ในปี ค.ศ. 1931 CIE ได้กำหนดมาตรฐานการมองเห็นของมนุษย์เพื่อให้ได้ฟังก์ชันความไวแสงของเซลล์ทั้งสาม (Color-matching function) $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ และ $\bar{z}(\lambda)$ ดังรูปที่ 9. ค่าไตรสตีมูลต์ XYZ จะถูกคำนวณมาจากฟังก์ชันการมองเห็นดังกล่าว. แต่เนื่องจากค่าไตรสตีมูลต์ XYZ นี้นำไปแปลความหมายของสีได้ค่อนข้างยาก, ดังนั้น CIE จึงนำเสนอปริภูมิสีใหม่ในปี ค.ศ. 1931 เป็นรูปกราฟสองมิติโดยไม่รวมความสว่างเข้ามาด้วย เรียกว่า ปริภูมิสี Yxy (Yxy color space), ทั้งนี้ให้ Y แทนค่าความสว่าง (ค่าไตรสตีมูลต์ Y), ส่วนค่า x และ y คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสีที่ได้จากการคำนวณค่าไตรสตีมูลต์ XYZ, ไดอะแกรมแสดงปริภูมิสีในระบบนี้ ดังรูปที่ 10. จากไดอะแกรมดังกล่าว บริเวณที่เข้าใกล้จุดกึ่งกลางจะไม่มีสีและสีจะสดเมื่อใกล้ขอบมากขึ้น. ถ้าวัดสีผลแอปเปิลโดยใช้หลักการดังกล่าว จะได้ค่า $x = 0.4832$ และ $y = 0.3045$ เป็นจุดที่ค่าทั้งสองตัดกันที่จุด A บนแผนผังดังรูปที่ 11, โดยค่า Y มีค่า = 13.37, หมายความว่า ผลแอปเปิลมีค่าการสะท้อนแสงที่ 13.37 % เมื่อเปรียบเทียบกับ การสะท้อนสมบูรณ์ที่ 100%.



รูปที่ 9. ค่าที่อ่านด้วยปริภูมิสี Yxy (Yxy color space).



รูปที่ 10. ความไวแสงของตามมนุษย์
(Color-matching function/1931 Standard Observer).



รูปที่ 11. ไดอะแกรมสี x, y ปี 1931.

1.5.8 ปฏิภูมิสีระบบ $L^* a^* b^*$

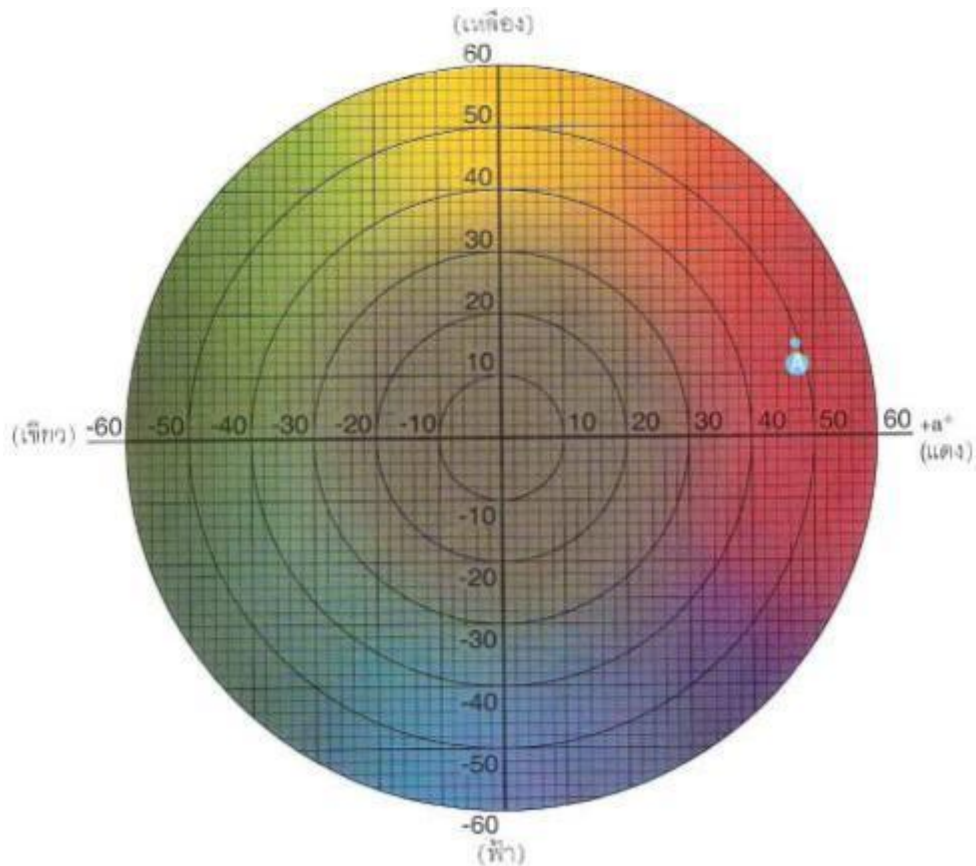
ระบบสี $L^* a^* b^*$ หรือ ซีแลป (CIE LAB) เป็นอีกระบบที่นิยมกันมากในการนำมาใช้วัดค่าสี และใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในหลายๆ วงการ. โดยปฏิภูมิสีเป็นประเภทที่มีสเกลสม่ำเสมอ (Uniform) ซึ่งถูกกำหนดโดย CIE ในปี ค.ศ. 1976 เพื่อแก้ปัญหาการแปลค่าสีที่เกิดขึ้นในระบบ Yxy , เนื่องจาก พบว่า ระยะ x กับ y บนไดอะแกรมสีจะไม่สอดคล้องกับความแตกต่างของสีที่เกิดจากการมองเห็นจริง. ในระบบสี $L^* a^* b^*$ นี้, ค่า L^* จะหมายถึงความสว่าง ส่วน a^* และ b^* จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์สี ดังรูปที่ 12. ไดอะแกรมดังกล่าว ค่า a^* และ b^* จะบอกถึงทิศทางของสี เช่น,

- a^* หมายถึงอยู่ในทิศของสีเขียว,

+ a^* หมายถึงอยู่ในทิศของสีแดง,

- b^* หมายถึงอยู่ในทิศของสีน้ำเงิน,

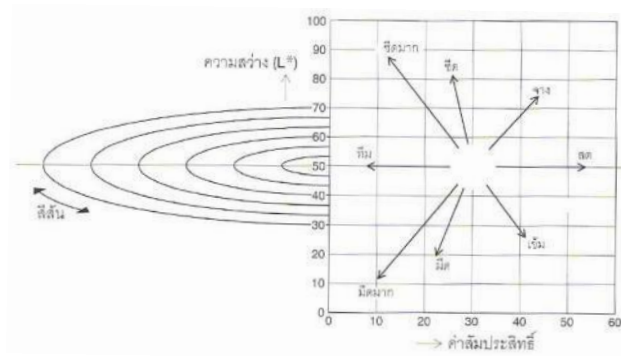
+ b^* หมายถึงอยู่ในทิศของสีเหลือง.



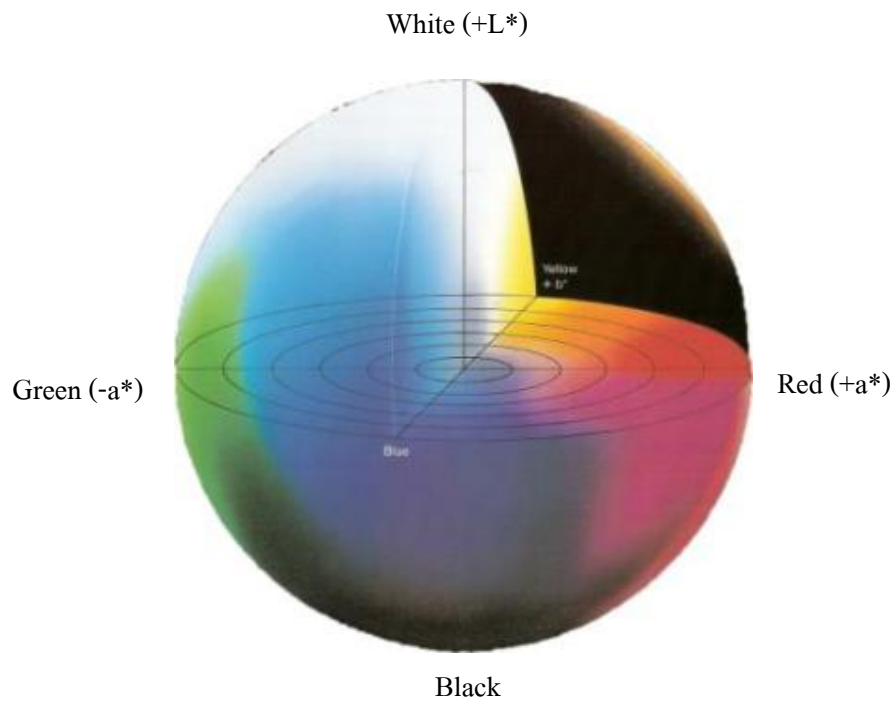
รูปที่ 12. ไดอะแกรมสัมประสิทธิ์สี a^*, b^* .

พื้นที่ตรงกลางจะไม่สามารถแยกสีได้ (Achromatic) เมื่อค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้น และจุดดังกล่าวเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางความอิ่มตัวของสีจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 12, ซึ่งแสดงให้เห็นค่าสีต่างๆ ของปริภูมิสี $L^* a^* b^*$ อย่างชัดเจน. รูปที่ 12 เป็นภาพที่ตัดตามขวาง โดยค่าความสว่าง (L) มีค่าที่เมื่อวัดสีของแอปเปิล. โดยใช้ระบบสี $L^* a^* b^*$ จะได้ค่าตามตัวอย่างข้างล่างค่าที่ได้แทนตำแหน่งสีได้อย่างไร. เมื่อจะพล็อตค่า a^* และค่า b^* ($a^* = +47.63$, $b^* = +14.12$) ลงบนแกน a^* และ b^* ในรูปที่ 12, จุด A เป็นจุดที่แสดงสีของแอปเปิล.

เมื่อตัดรูปทรงของสีตามแนวตั้งผ่านจุด A และจุดศูนย์กลาง เราจะเห็นสีแตกต่างกันไปเมื่อความสว่างเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 13.



รูปที่ 13. ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง.



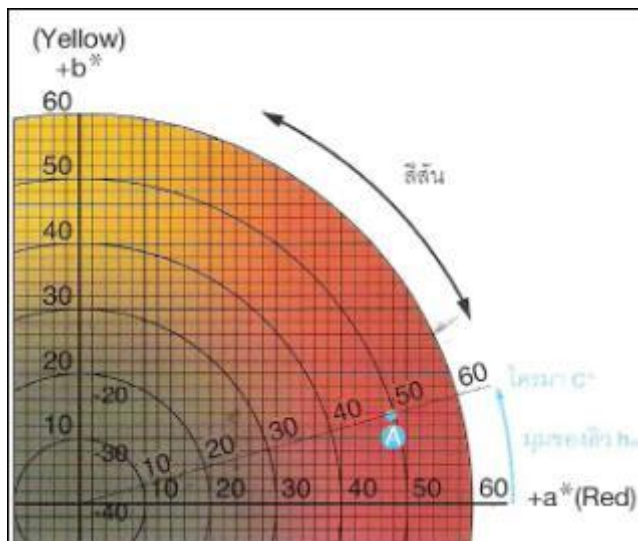
รูปที่ 14. ค่าสัมประสิทธิ์สีและความสว่าง.

1.5.9 ปฏิภูมิสีระบบ L* C* h

ปฏิภูมิสีระบบ L* C* h ใช้ไดอะแกรมสีแบบเดียวกับระบบ L* a* b* แต่รูปร่างต่างกันที่เป็นกรวยแหลมแทนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในระบบนี้.

- ค่า L* หมายถึง ความสว่าง เช่นเดียวกับค่า L* ใน L* a* b*
- C* หมายถึง ค่าโครมา (Chroma)
- ค่า C* จะมีค่าเป็น 0 ที่จุดศูนย์กลาง และจะมีสีเข้มตัวมากขึ้น เมื่อออกห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น
- h หมายถึง มุมของ ฮิว (Hue angle)
- ค่า h ที่แทนค่า ฮิว จะเริ่มนับค่าบนแกนด้าน +a* จะเป็น (สีแดง) เมื่อเป็นมุม 90 องศา
จะเป็นแกน +b* (สีเหลือง) ที่มุม 180 องศา
จะเป็นแกน -a* (สีเขียว) ที่มุม 270 องศา
จะเป็นแกน -b* (สีน้ำเงิน) ที่มุม 0, 360 องศา

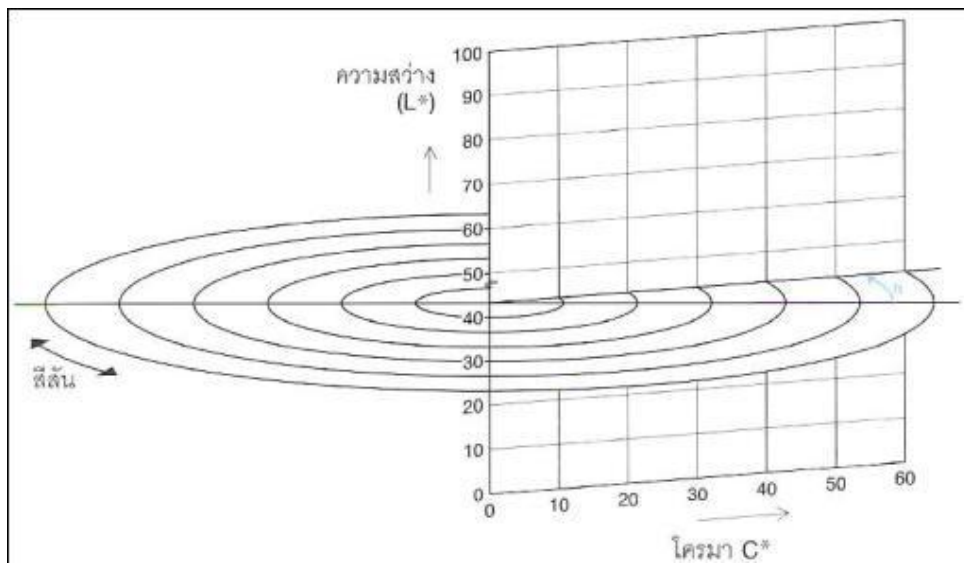
จะได้ค่าของสีดังรูปที่ 15, ถ้านำค่าที่ได้มาลงจุดบนกราฟในรูปที่ 16, จะได้จุด A ตามต้องการ.



รูปที่ 15. ค่าสัมประสิทธิ์ L* a* b* ในไดอะแกรมสี.

$$\text{Chroma } C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$\text{Hue angle } h_{ab} = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*}$$



รูปที่ 16. ค่าโครมาและความสว่าง.

1.5.10 ปริภูมิสีระบบ Hunter Lab

ปริภูมิสีระบบฮันเตอร์ พัฒนาโดยนายอาร์.เอส.ฮันเตอร์ โดยมีหลักการให้กำหนดสเกลที่สม่ำเสมอ (Uniform) มากกว่าระบบสีแบบ Yxy ของ CIE ปี ค.ศ. 1931. ในปัจจุบัน ยังคงมีการใช้อยู่มากในหลายอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับระบบสีแบบ $L^* a^* b^*$, โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมสีในสหรัฐอเมริกา.

1.6 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบวิธีวิจัย

1.6.1 การสกัด (Extraction) (ไชยเรืองศรี ม.ป.ป)

การสกัดด้วยตัวทำละลายสามารถแบ่งออกตามชนิดตัวถูกละลายได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ :

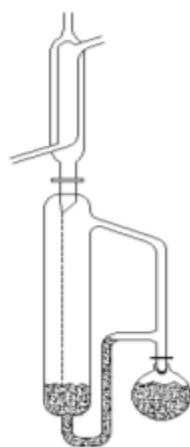
1. การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบ Liquid-liquid extraction อาศัยหลักการใช้ตัวทำละลายของเหลวชนิดหนึ่งสกัดตัวถูกละลายออกจากของเหลวอีกชนิดหนึ่ง.
2. การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบ Solid-liquid extraction อาศัยหลักการใช้ตัวทำละลายสกัดตัวถูกละลายออกจากของแข็ง.

การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบ Liquid-liquid extraction

การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบ Liquid-liquid extraction แบ่งได้เป็น 2 วิธี

1. การสกัดแบบ Batch หลักการสกัดคือ การทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายได้ในตัวทำละลายที่ 1 (ปกติตัวทำละลายคือน้ำ) กระจายไปสู่ตัวทำละลายที่ 2 (ปกติคือตัวทำละลายอินทรีย์), โดยที่ตัวทำละลายทั้งสองชนิดนี้สัมผัสกันแต่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน. วิธีสกัดสามารถทำได้ง่าย โดยนำสารละลายที่ต้องการแยกใส่ในกรวยแยก (Separator funnel), แล้วเติมสารทำละลายอินทรีย์ลงไป. จากนั้นเขย่ากรวยแยก 2-3 นาที, คว่ำกรวยแยกแล้วเปิดจุกเพื่อระบายความดัน, แล้วหงายกรวยเพื่อเขย่าต่อ. ทำแบบนี้ 2-5 ครั้งจนกระทั่งตัวถูกละลายและตัวทำละลายมีการกระจายตัวอย่างสมดุล. ตั้งกรวยแยกทิ้งไว้จนกระทั่งตัวทำละลายแยกชั้น, จึงเปิดวาล์วแล้วเอาตัวทำละลายอินทรีย์ออก. เติมตัวทำละลายใหม่เข้าไปสกัดตัวถูกละลายที่ยังคงเหลืออยู่ในชั้นตัวทำละลายของน้ำ แล้วเขย่าเช่นเดิม. เมื่อถึงจุดสมดุล จะแยกตัวทำละลายอินทรีย์ออกและเก็บรวมไว้กับครั้งแรก. ทำเช่นนี้ 2-3 ครั้ง, จะได้ตัวถูกละลายในชั้นตัวทำละลาย, แล้วระเหยตัวทำละลายอินทรีย์ออก, ซึ่งอาจใช้ Rotary evaporator จนเข้มข้นระดับหนึ่ง, แล้วจึงใช้ Sodium sulfate หรือ Magnesium sulfate ดูดน้ำที่ยังคงเหลืออยู่ แล้วอาจนำไปทำให้เข้มข้นมากขึ้นอีก.

2. การสกัดแบบต่อเนื่อง (Continuous extraction) เป็นการสกัดที่ต้องทำหลายครั้ง เพื่อให้ได้สารที่ต้องการแยกตัวออกมามากที่สุด พบว่า การใช้การสกัดแบบ Batch นั้นไม่สะดวกและอาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากการถ่ายเทตัวทำละลายหลายๆ ครั้ง. นอกจากนี้ ยังทำให้เสียเวลาและสิ้นเปลืองตัวทำละลาย. เครื่องมือการสกัดแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 17, โดยให้ความร้อนกับ Flask ที่เก็บตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งระเหยได้ง่ายจะกลายเป็นไอ. จากนั้น จะถูกควบแน่นและหยดลงมาตรงหลอดใส่ตัวอย่างที่ต้องการสกัด, ตัวทำละลายจะไหลล้นออกมาจากหลอดใส่ตัวอย่างและกลับไปยัง Flask ที่เก็บตัวทำละลาย, เป็นเช่นนี้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสกัดเสร็จสมบูรณ์.



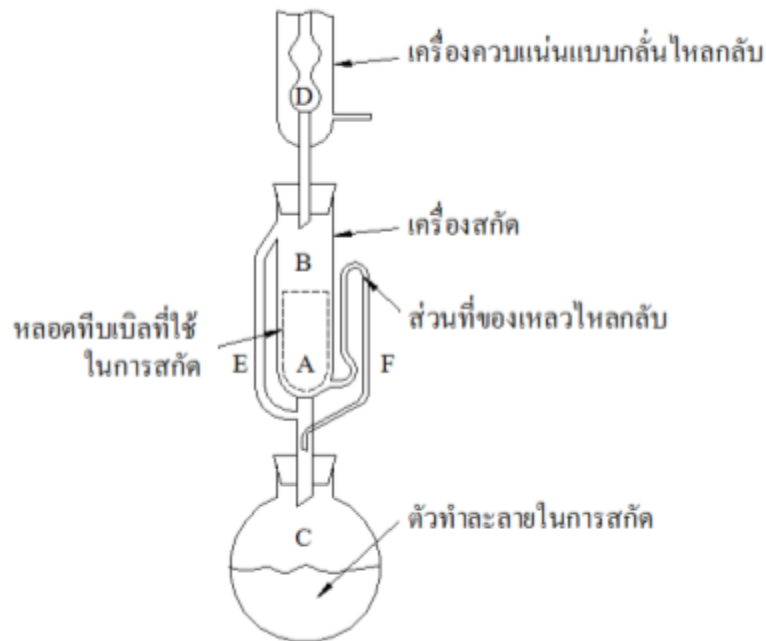
รูปที่ 17. การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบต่อเนื่อง (Continuous liquid-liquid extraction).

การสกัดด้วยตัวทำละลายแบบ Solid-liquid extraction

การสกัดด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการละลายของตัวถูกละลายในตัวทำละลายและเวลาที่ใช้, จะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวถูกละลายที่อยู่ในตัวอย่างของแข็ง. ถ้าตัวถูกละลายเพียงดูดซับที่ผิวของแข็งการสกัดจะใช้เวลานาน, แต่ถ้าตัวถูกละลายอยู่ในโครงร่างผลึกของแข็งต้องใช้เวลามากกว่า, ต้องบดของแข็งให้ละเอียดก่อน. การสกัดของแข็งสามารถทำได้ 2 แบบ ได้แก่ :

1. หากตัวถูกละลายดูดซับที่ผิวและละลายในตัวทำละลายได้ดี การสกัดสามารถทำได้ง่ายๆ โดยนำสารตัวอย่างแช่ในตัวทำละลาย. จากนั้น ทำการกวนแล้วทิ้งไว้จนแน่ใจว่า ตัวถูกละลายสกัดออกมาหมด จึงกรองตัววัตถุบออก, แล้วเปลี่ยนวัตถุบใหม่ ทำซ้ำ 3-4 ครั้ง. หลังจากนั้น นำสารสกัดที่สกัดได้ ไปแยกออกให้บริสุทธิ์หรือทำให้เข้มข้น เช่นการกลั่น, การสกัด. วิธีนี้นิยมใช้กับดอกไม้ที่มีกลิ่นดอกบาง เช่น มะลิ, อัญชัน, ชา, เป็นต้น.

2. หากตัวถูกละลายเป็นสารประกอบที่มีการละลายในตัวทำละลายต่ำหรือการสกัดจะสมบูรณ์ต้องใช้เวลานาน จำเป็นต้องใช้เทคนิคการสกัดอย่างต่อเนื่อง. เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำการสกัดอย่างต่อเนื่องที่รู้จักทั่วไป เช่น Soxhlet extraction ดังรูปที่ 18. โดยบรรจุสารตัวอย่างลงใน Timber A แล้วใส่ลงในหลอดแก้ว B, ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ระเหยกลายเป็นไอได้ จะถูกบรรจุอยู่ในขวดกลม C. เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวทำละลายในขวดกลม, ตัวทำละลายจะเหวกลายเป็นไอผ่านหลอดแก้ว E ผ่านไปยังตัวควบแน่น D. เมื่อตัวทำละลายถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลว จะไหลตกลงมาบนสารตัวอย่างที่ต้องการสกัดใน Timber A. เมื่อตัวทำละลายถูกสะสมในหลอดแก้ว B มากเพียงพอ จะเกิดกาลักน้ำ (Reflux) कुछของเหลวให้ไหลกลับมายังขวด C. ทางหลอดแก้ว F สารที่ถูกสกัดจะออกมากับตัวทำละลายและสะสมอยู่ในขวด C, ตัวทำละลายจะถูกความร้อนทำให้กลายเป็นไอแล้วควบแน่นมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่อง. การสกัดด้วยเครื่องชนิดนี้จะสามารถทำงานติดต่อกันเป็นเวลานาน, ประหยัดเวลา และใช้ตัวทำละลายไม่มาก.



รูปที่ 18. เครื่องสกัดอย่างต่อเนื่อง หรือเครื่องสกัดซอกเลต (Soxhlet extraction).

1.6.2 การกวน (Stirring) (ทองสมบุญ 2535)

การกวน (Stirring) เป็นการกระจายขององค์ประกอบหนึ่งเข้าไปในองค์ประกอบอื่น ในวัฏจักรที่แยกกัน. เมื่อให้เวลาของการกวนมากพอ จะได้ของกวนที่มีองค์ประกอบเฉลี่ยเท่าๆ กันทุกส่วน. การกวนกันได้อย่างสมบูรณ์ จึงอาจกำหนดได้ว่า องค์ประกอบต่างๆ ในตัวอย่างที่สุ่มออกมา จะต้องเหมือนกับองค์ประกอบในของกวนทั้งหมด, แต่ในการกวนด้วยเครื่องจักรจริงจะไม่ได้เป็นอย่างนั้น. ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงใช้ค่าจำกัดความทางสถิติแทน. กล่าวคือ องค์ประกอบในตัวอย่างที่สุ่มเก็บมา จะต้องมีโอกาสที่จะพบได้เหมือนกับการกระจายแบบสุ่มขององค์ประกอบเริ่มแรก, ดังนั้น จึงใช้การวิเคราะห์ทางสถิติในการดูสภาพของกวน.

การวิเคราะห์ทางสถิติที่กล่าวคือ การคำนวณหาปริมาณสารที่สนใจในตัวอย่างว่า จะเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของสารนั้นในของกวนทั้งหมดมากน้อยเพียงใด, ซึ่งสามารถแทนได้ด้วย รากค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square deviation) ใช้อักษรย่อว่า S, ดังนี้ :

$$s = \left\{ \left(\frac{1}{n} \right) \left[[x_1 - x_m]^2 + [x_2 - x_m]^2 + \dots + [x_n - x_m]^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

โดยที่ n คือ จำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

ถ้าค่า S มากแสดงว่า การกวนยังไม่ดีพอ. อย่างไรก็ตาม ปริมาณของตัวอย่างที่สุ่มเก็บมา จะต้องให้เหมาะสม ซึ่งมีขนาดที่กำหนดเป็นมาตรฐานตามระบบ SI อยู่แล้ว และในบางกรณี อาจใช้คำว่า S² ซึ่งคือค่า Variance ของสัดส่วนองค์ประกอบในตัวอย่งจากค่าเฉลี่ยมาใช้พิจารณาแทนก็ได้ ซึ่งแทนได้ด้วยสมการ ดังนี้.

$$s^2 = \frac{1}{n} [\sum(x_i^2)] - \bar{x}_m^2$$

โดยที่ i คือลำดับของชิ้นงาน
m คือค่าเฉลี่ย

หลักการพิจารณาการกวนของเหลว

การกวนจัดเป็นกระบวนการที่สำคัญ โดยมีทั้งการส่งผ่านความร้อน, การถ่ายโอนมวลสาร, เป็นปัจจัยสำคัญ. การกวนเป็นส่วนที่เพิ่มเติมให้กระบวนการทางเคมีสมบูรณ์ยิ่งขึ้น.

การกวน หมายถึง การคลุกเคล้าวัตถุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดผลในระดับที่เป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี. กรณีของการกวนเป็นก๊าซ การกวนจะเกิดขึ้นรวดเร็วโดยธรรมชาติของการแพร่ของโมเลกุล, แต่ในของเหลวการแพร่สามารถเกิดขึ้นได้แต่ช้ามาก. ดังนั้น จำเป็นต้องใช้พลังงานกลเข้าไป โดยการหมุนของใบกวน เพื่อให้เกิดการกวนกันอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น. พลังงานกลจะถูกใช้อย่างทิ้งเปลว ถ้าเลือกชนิดของใบกวนไม่ตรงกับความต้องการกับกระบวนการของการกวน.

ใบกวน หมายถึง การสร้างให้เกิดการกระทำระหว่างสถานะ เช่น การไหล หรือการปั่นป่วน ซึ่งเป็นส่วนให้การกวนลุล่วงไป. การหมุนของใบกวนในภาวะที่บรรจุของเหลวจะทำให้เกิดการไหลวน ซึ่งเป็นส่วนให้การกวนลุล่วงไป, มีผลให้เกิดผลต่างของความเร็วในของเหลว, สร้างให้ของเหลวมีกระแสของการไหลอย่างรวดเร็ว แล้วเคลื่อนที่เข้าหาผนัง. การเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ของของเหลว จะทำให้เกิดการหยุดนิ่งที่ผนังของภาชนะ, สังเกตได้จากการถ่ายโอนโมเมนตัม. ดังนั้น การกวนของเหลวจำเป็นต้องกล่าวถึงแรงที่จะทำให้เกิดการแพร่ของมวลของของเหลว.

ระดับของการกวน (The degree of stirring)

ระดับของการกวนของระบบหนึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัวแปร, โดยตัวแปรที่ 1 คือขนาดของกระแสการไหลวน (Eddy current) หรือ การเกิดการปั่นป่วน (Turbulence), อีกตัวแปรหนึ่งคือแรงต้านทานของการเกิดลักษณะดังกล่าว, ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปของสมการอัตราได้ดังสมการ.

Flow of rate	=	$\frac{\text{Driving force}}{\text{Resistance}}$
โดย		
Driving force	=	แรงที่ใช้ในการสร้างการไหลวน หรือการไหลแบบปั่นป่วน.
Resistance	=	แรงที่ต้านทานการเกิดการไหลวนหรือการไหลแบบปั่นป่วน.
Flow of rate	=	ระดับของการกวน (The degree of stirring).

ระดับการกวนที่ดีเกิดขึ้นเมื่อมวลของเหลวในภาชนะอยู่ภายใต้สภาวะของการไหลอย่างปั่นป่วน, ปริมาณพลังงานกลที่ต้องเพิ่มเข้าไปในของเหลวเพื่อให้เกิดการไหลอย่างปั่นป่วนขึ้นอยู่กับ,

- คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ต้องการกวน,
- รูปแบบของภาชนะ (Vessel geometry),
- รูปแบบของใบกวน (Agitator geometry).

การกวนขึ้นกับความหนืด (Stirring as a function of viscosity)

ของเหลวหนืดมีผลต่อการสร้างรูปแบบการไหลโดยการหมุนของใบกวน, ความหนืดเป็นคุณสมบัติของของเหลวที่แสดงการต้านการไหลหรือการเปลี่ยนรูปร่างของเหลวภายในและการดึงดูดของโมเลกุล. ของเหลวที่มีความหนืดมาก ต้องการปริมาณของพลังงานกลจำนวนมากเพื่อเปลี่ยนสภาวะของการไหล. ส่วนของเหลวที่มีความหนืดน้อย จะมีแรงต้านทานการไหลต่ำ, จึงต้องการปริมาณพลังงานกลเพียงเล็กน้อย จะทำให้เกิดสภาวะของการกวนได้.

กลุ่มของตัวแปรไร้มิติที่สำคัญในการคำนวณเกี่ยวกับการกวน

กลุ่มของตัวแปรไร้มิติที่เป็นที่นิยมและสะดวกในการใช้หาความสัมพันธ์ทางข้อมูล วิทยาศาสตร์และวิศวกรรม, ตัวแปรไร้มิติบางตัวมีความสำคัญที่สุดและใช้กันอย่างกว้างขวาง. ในการออกแบบเกี่ยวกับระบบการกวน กลุ่มของตัวแปรไร้มิติที่สำคัญแสดงได้ดังนี้ :

กำลังที่ต้องการในการขับเคลื่อนใบกวน (Power number),

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_a^5}$$

การคำนวณกำลังที่ต้องการใช้ในการขับเคลื่อนใบกวน ต้องพิจารณาถึงชนิดของถังกวนว่าเป็นแบบมีคิริบหรือไม่มีคิริบ และรู้ค่าตัวแปรไร้มิติที่สำคัญในการคำนวณ ดังนี้ :

ค่าที่แสดงความรุนแรงในการกวนสาร (Reynolds number),

$$Re = \frac{\rho N D_a^2}{\mu}$$

ค่าที่แสดงผลของการเกิด Vortex (Frode number),

$$Fr = \frac{N^2 D_a}{g}$$

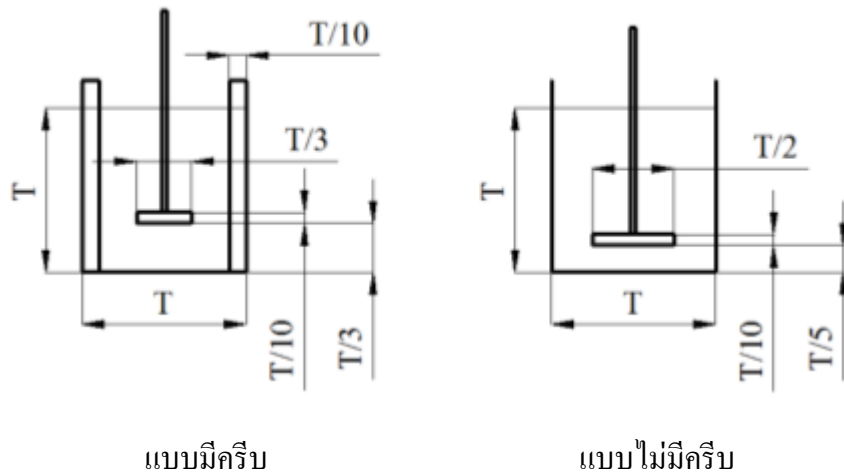
ค่าที่แสดงจำนวนการไหลเวียน (Flow number),

$$No = \frac{Q}{N D_a^3}$$

โดยที่	D_a	=	ขนาดใบกวน,
	Fr	=	Frode number,
	g	=	แรงโน้มถ่วงของโลก,
	No	=	จำนวนการไหลเวียน,
	N_p	=	กำลังในการขับเคลื่อนใบกวน,
	Q	=	อัตราการไหล,
	Re	=	Reynolds number,
	μ	=	ความหนืด,
	ρ	=	ความหนาแน่น,

1.6.3 ชนิดของใบกวน

ถังกวนที่ใช้กันมากในการกวนสารหรือในลักษณะเครื่องปฏิกรณ์เคมี เพื่อกระบวนการผลิตต่างๆ, ทั้งนี้ เนื่องจากการสร้างและการควบคุมทำได้ง่าย. ถังกวนมาตรฐานแบ่งได้ 2 แบบ คือ แบบมีครีบริบและแบบไม่มีครีบริบ, แสดงดังรูปที่ 19.



รูปที่ 19. สัดส่วนของส่วนประกอบต่างๆ สำหรับถังกวนมาตรฐานแบบมีครีบริบและไม่มีครีบริบ.

ที่มา : Holland and Chapman (1966).

ถังกวนแบบมีครีบริบ (Baffled tank)

ใช้ในการกวนของเหลวที่ต้องการการไหลอย่างรุนแรง ปกติจะมีครีบริบ 4 อัน, ความกว้างเป็น $1/10$ หรือ $1/12$ เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง. ระดับของเหลวในถังจะสูงประมาณเท่าเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง' ถ้าต้องการถังสูง ต้องใช้ใบกวนหลายใบเป็นจำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางถังนั้นขึ้นไป. ใบกวนมีขนาด $1/3$ ของถังและตั้งห่างจากพื้นถัง $1/3$ หรือ $1/2$ ของขนาดถัง. ตัวใบกวนอาจเป็นแผ่นตรง (Straight blade) หรือเป็นแผ่นโค้ง (Curved blade), อาจติดอยู่บนแกน (Hub mounted) หรือติดไว้บนแผ่นกลม (Disk mounted), ถ้าใช้กระจายก้ำจะจะมีแผ่นกลมปิดข้างบน (Vane disk).

ถังกวนแบบไม่มีครีบริบ (Unbaffled tank)

ถังกวนแบบไม่มีครีบริบใช้เมื่อไม่ต้องการให้ของแข็งเกาะตามครีบริบหรือเมื่อต้องการกวนให้ความเร็วรอบของใบกวนต่ำๆ. การกวนในถังชนิดนี้จะเกิดผิววาลงไป (Free vortex) ในแนวแกน

ของใบกวนดังรูปที่ 20. ถ้าความเร็วรอบของการกวนสูง ผิวของของเหลวจะต่ำลงมากใกล้ใบกวน, จึงมีขีดจำกัดในการกำหนดความเร็วของใบกวน. เวลาที่ใช้ในการกวนจึงมากกว่าถังแบบมีครีป. ใบกวนที่ใช้กับถังกวนแบบไม่มีครีปมักเป็นชนิดที่มีขนาดใหญ่และแนบชิดกับผนังของภาชนะ.

$$\frac{r_c}{r_1} = \frac{Re_1}{10^3 + 1.6 Re_1}$$

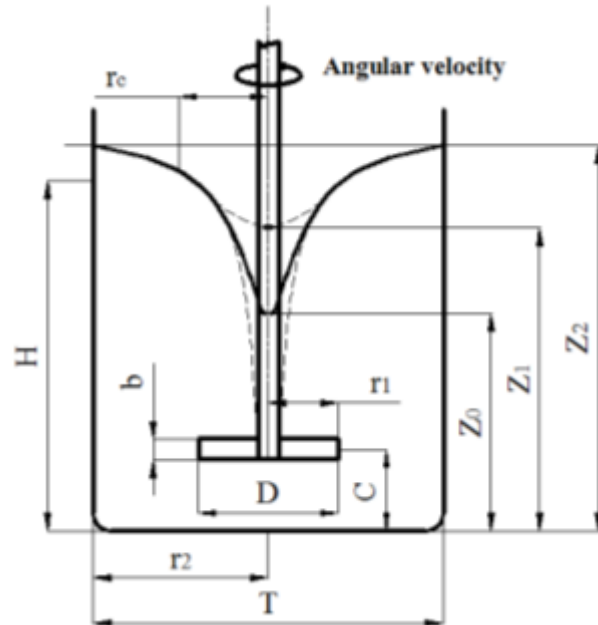
Re_1 = Reynolds number

Original Liquid Height

$H = T$

Impeller Position

$C = T/5$

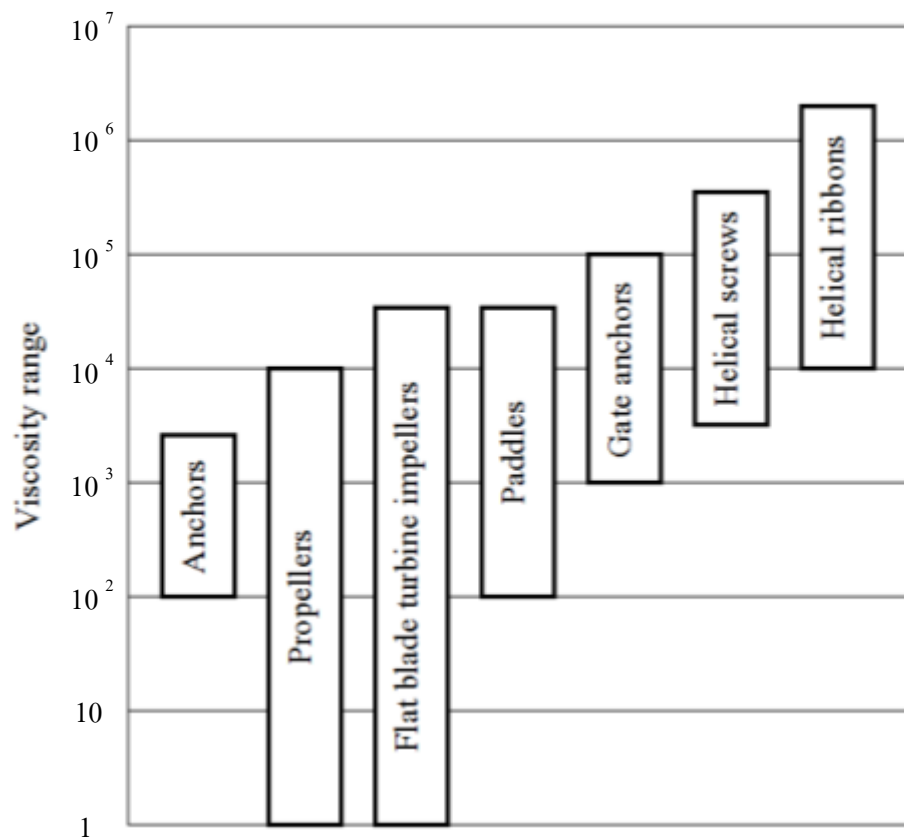


รูปที่ 20. สภาพของการเกิดวังวน (Vortex) ในการกวนในถังกวนแบบไม่มีครีป.

ที่มา : Holland and Chapman (1966).

ใบกวนเป็นอุปกรณ์ในการสร้างแบบการไหลในระบบ ทำให้ของเหลวไหลหมุนเวียนรอบภาชนะและไหลวนเข้าสู่ใบกวน, วนเวียนไปมาเช่นนี้. ใบกวนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามการทำงาน, ได้แก่ ชนิดที่ทำงานให้กระแสไหลในแนวที่ขนานกับแกนหมุน เรียกว่า ชนิด Axial-flow impellers เช่น พวกใบพัดเรือ (Marine type impeller) และอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้กระแสไหลในแนวที่ตั้งฉากกับแกนหรือในแนวรัศมี เรียกว่า ชนิด Radial-flow impellers เช่น พวกใบพาย (Paddles) และพวกเทอร์ไบน์ (Turbine-type impellers). แต่มีการออกแบบให้เกิดการไหลทั้ง 2 รูปแบบได้ด้วยเช่น พวกเทอร์ไบน์ใบเอียง (Pitched blade turbine).

ในระบบการกวนของเหลว ปัจจัยทั้ง 3 อย่างที่กล่าวมาข้างต้นคือ คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่ต้องการกวน, รูปแบบของภาชนะ และรูปแบบของใบกวน. จากนั้น จะแสดงความสัมพันธ์ของใบกวนที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านความหนืด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบให้เกิดความชัดเจน, ดังรูปที่ 21.



รูปที่ 21. ความสัมพันธ์ของความหนืดของของเหลวที่มีผลต่อการเลือกชนิดของใบกวน.

การพิจารณาเลือกชนิดของใบกวน โดยทั่วไปมีหลักการพิจารณา ดังนี้ :

1. พิจารณาจากสถานะของสารที่ต้องการกวน,
 - กวนของแข็งกับของแข็ง,
 - กวนของแข็งกับของเหลว,
 - กวนของเหลวกับของเหลว,
 - กวนของเหลวกับของก๊าซ.
2. พิจารณาจากความหนืดของสารที่ต้องการกวน.
3. พิจารณาว่าสารกวนมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นหรือไม่.

ตัวแปรสำคัญของการกวนได้แก่ ชนิดใบกวน, โดยความเร็วรอบของการกวน กับเวลา มีความสัมพันธ์ผกผันกัน. ถ้าใช้ความเร็วรอบของการกวนน้อย ต้องใช้เวลาของการกวนนานขึ้น, แต่ถ้าใช้ความเร็วรอบของการกวนมาก ต้องใช้เวลาของการกวนลดลง, ดังสมการด้านล่าง (Holland and Chapman 1966).

$$N * t = \text{Constant}$$

โดยที่ N = ความเร็วรอบของการกวน,
t = เวลาของการกวน (Batch stirring time),
โดยทั่วไป Constant = 30.0 ~ 33.0.

โดยทั่วไปสามารถจัดกลุ่มของใบกวนได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ :

1. ใบพัด (Propeller) เป็นใบกวนที่มีแกนหมุนในแนวตั้ง ทำให้ของเหลวในภาชนะมีพฤติกรรมไหลมีลักษณะการไหลในแนวแกน (Axial flow). โดยปกติใบกวนชนิดนี้ต้องการการไหลในอัตราเร็วสูง, สามารถใช้สำหรับกวนของเหลวที่มีความหนืดในช่วงกว้างตั้งแต่ 1 ถึง 10^4 cp. ตัวอย่างของใบกวนชนิดนี้ได้แก่ Marine propeller, ดังรูปที่ 22.

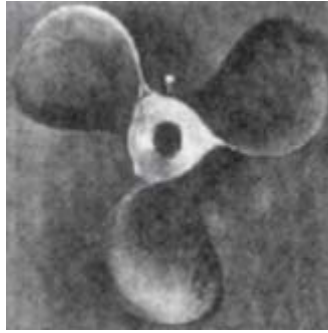
2. ใบพาย (Paddle) เป็นใบกวนชนิดแบนราบสี่เหลี่ยมผืนผ้าติดอยู่บนแกนหมุนที่ตั้งในแนวตั้ง, โดยทั่วไปใช้กวน 2 หรือ 4 ใบ บิดเป็นมุมฉากออกมา, บางครั้งใบกวนจะวางเป็นแนวเอียง. ใบกวนชนิดนี้, มักจะใช้ในระดับความเร็วช้าจนถึงปานกลาง. ใบกวนในกลุ่มนี้สามารถจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ :

2.1 กลุ่มใบพายขนาดเล็ก (Small blade paddle) ตัวอย่างเช่น

- Anchor,
- Basic straight blade paddle.

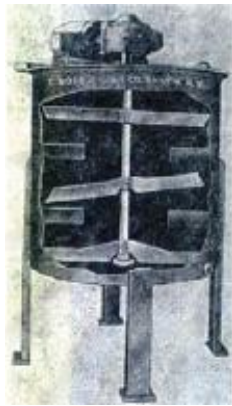
2.2 กลุ่มใบพายขนาดใหญ่ (Large blade paddle) ตัวอย่างเช่น

- Horseshoe,
- Horseshoe with cross-member,
- Gate anchor,
- Double motion horseshoe-paddle,
- Helical ribbon screw,
- Double helical ribbon screw.



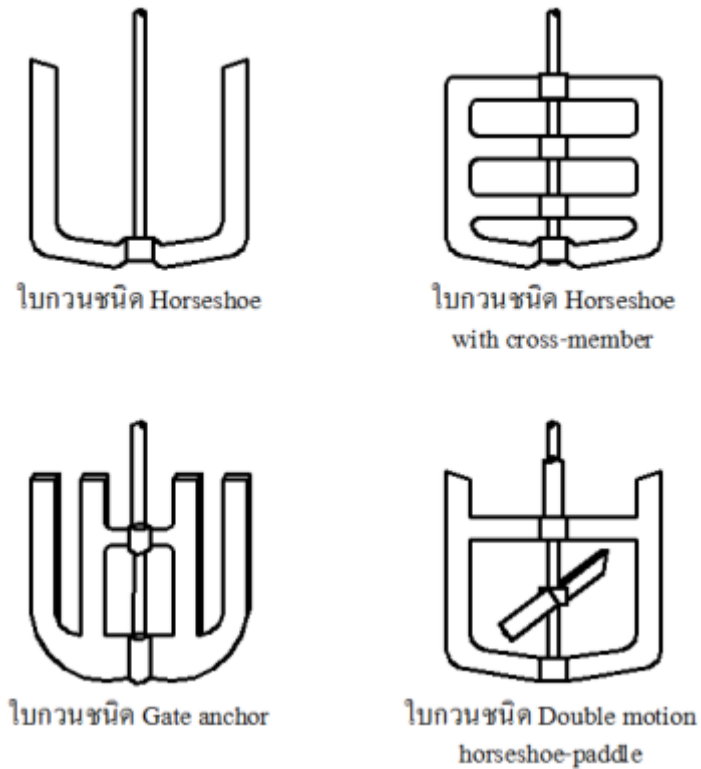
รูปที่ 22. ใบกวนชนิด Marine propeller.

ที่มา : Holland and Chapman (1966)



รูปที่ 23. ใบกวนชนิด Basic straight blade paddle.

ที่มา : Holland and Chapman (1966)

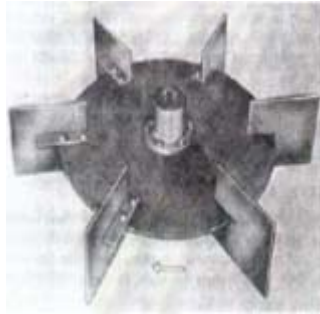


รูปที่ 24. ไบกวนชนิด Large blade paddle.

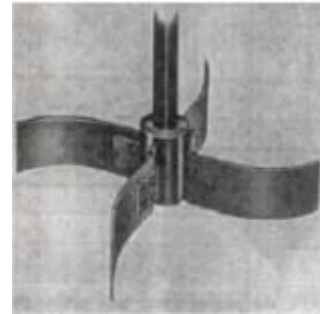
ที่มา : Holland and Chapman (1966)

3. ไบกังหัน (Turbine) เป็นไบกวนที่เหมาะสมสำหรับกวนของผสมที่มีความหนืดในช่วงที่กว้างตั้งแต่ 1 ถึง 10^4 cp. และมีพฤติกรรมในการไหลในภาชนะเป็นแบบไหลในแนวรัศมี (radial flow). ไบกวนชนิดนี้เหมาะกับความเร็รรอบการกวนที่สูง ดังรูปที่ 25, ตัวอย่างเช่น,

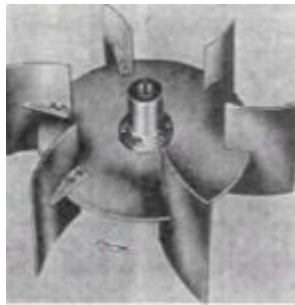
- Six blade flat blade turbine,
- Hub mounted curved blade,
- Disk mounted curved blade,
- Pitch blade turbine.



ใบกวนชนิด Six blade flat blade turbine



ใบกวนชนิด Hub mounted curved blade



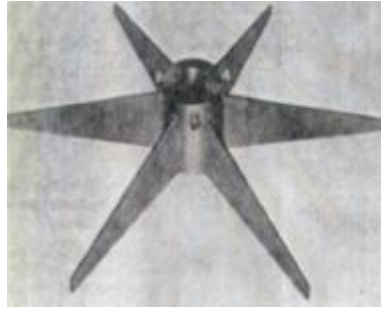
ใบกวนชนิด Disk mounted curved blade

รูปที่ 25. ใบกัณฑ์ (Turbine).

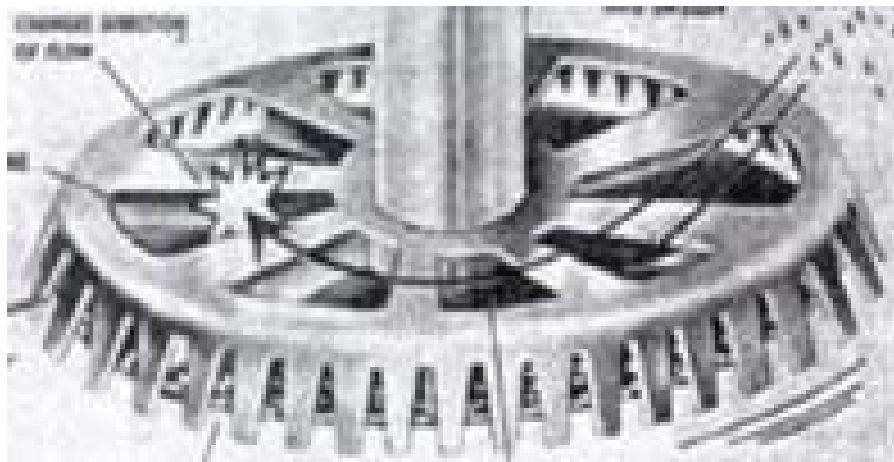
ที่มา : Holland and Chapman (1966)

นอกจากนี้ ยังมีใบกวนที่ใช้งานเฉพาะอย่างและไม่อาจจัดอยู่ใน 3 กลุ่มแรก ได้แก่ ใบกวนชนิด High shear impellers, ซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง เพื่อตีกระจายของแข็งให้แตกขาดหรือการกระจายของเหลวชนิดหนึ่งให้เป็นหยดละเอียดในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า อิมัลชัน (Emulsion). ใบกวนจำพวกนี้ ได้แก่ :

- Disk type,
- Modified disk,
- Modified turbine,
- Saw tooth edge.



รูปที่ 26. ใบกวนชนิด Modified turbine high shear.



รูปที่ 27. ใบกวนชนิด Sew tooth edge modified turbine shear.

ที่มา : Holland and Chapman (1966)

1.6.4 การวัดการไหล (Flow measurement) (ก้าวกลีกรรม 2546).

การวัดการไหล เป็นการวัดสาร (Matter) ในขณะที่เคลื่อนที่. ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการของการวัดการไหล จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงตัวกลางของการไหลและคุณลักษณะในการเคลื่อนที่. เนื่องจากการไหลมีการเคลื่อนที่ การวัดการไหลจึงเป็นการวัดเชิงพลวัต (Dynamic measurement). ในความเป็นจริง สัญญาณของการวัดการไหลกล่าวได้ว่า เป็นลักษณะการรบกวน (noisy), ซึ่งเป็นความเข้าใจและรับรู้ในเชิงพลวัตที่เปลี่ยนแปลงธรรมชาติของการไหล. ดังนั้น คุณภาพการวัดเป็นสิ่งจำเป็นภายใต้สภาวะเหล่านี้และสามารถกระทำได้ด้วยความเข้าใจเกี่ยวกับตัวกลางของตัวกลางของไหล. วิธีที่ตัวกลางของไหลเคลื่อนที่ในระบบท่อและผลกระทบของระบบต่อการเคลื่อนที่นั้น.

สารตัวกลางของไหล

การวัดการไหลของของไหลที่เคลื่อนที่ อาจกล่าวได้ว่า สารตัวกลางไหลปรากฏในสามรูปแบบ (สถานะ) ได้แก่ ของแข็ง, ของเหลว และก๊าซ, แต่สำหรับในกระบวนการผลิตโดยทั่วไป การวัดการไหลเป็นการวัดสารตัวกลางที่เคลื่อนที่รูปสถานะของเหลวหรือก๊าซ. อย่างไรก็ตาม มักจะพบโดยทั่วไปว่า การไหลของสารตัวกลางในระบบมีสารสถานะอื่นปะปนเข้ามาด้วย ได้แก่ :

1. ของแข็งปะปนในของเหลว,
2. ก๊าซปะปนในของเหลว,
3. ของแข็งปะปนในก๊าซ,
4. ของเหลวปะปนในก๊าซ,
5. ของแข็งและก๊าซปะปนในของเหลว,
6. ของแข็งและของเหลวปะปนในก๊าซ.

สิ่งที่ปะปนมักจะก่อให้เกิดปัญหาในการวัดการไหลอยู่เสมอ แต่เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงให้เกิดขึ้นได้ยากในกระบวนการผลิต.

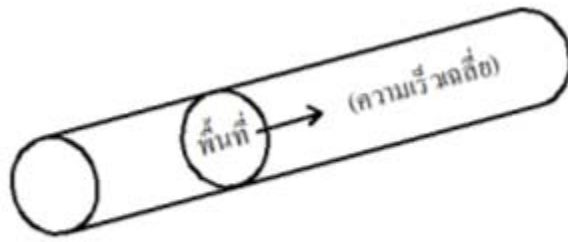
สารตัวกลางของไหลในขณะเคลื่อนที่

คุณลักษณะของสารตัวกลางของไหลในขณะเคลื่อนที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการไหลของของไหล มีที่มาจาก,

1. สมการของความต่อเนื่อง (Equation or continuity),
2. ทฤษฎีของเบอร์นูลลี (Bernoulli's theorem),
3. งานของเรย์โนลด์ (Reynolds).

สมการของความต่อเนื่อง (Equation or continuity)

อัตราปริมาตรของการไหล (Q) ที่ไหลผ่านจุดจุดหนึ่งมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดปกติ (A) ณ จุดนั้นคูณด้วยความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่ผ่านพื้นที่นั้น (\bar{V}), ดังรูปที่ 28.



$$\bar{V}_1 = \text{ความเร็วเฉลี่ย}$$

รูปที่ 28. อัตราการไหลเชิงปริมาตรมีความสัมพันธ์กับพื้นที่และความเร็วเชิงเส้น.

อัตราการไหลเชิงปริมาตร = พื้นที่ x ความเร็วเฉลี่ย

$$Q = A \times \bar{v}$$

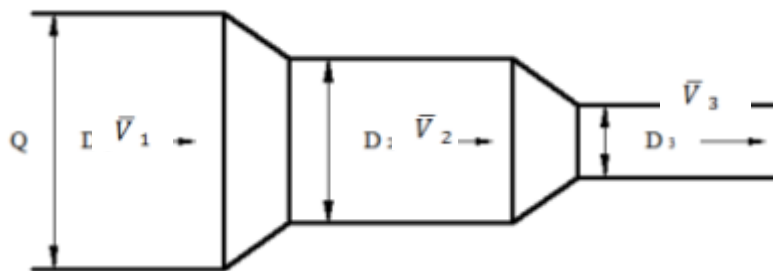
$$\frac{\text{m}^3}{\text{s}} = \text{m}^2 \times \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

โดยที่ Q = ปริมาณของไหล (m³/s),

A = พื้นที่หน้าตัด (m²),

\bar{v} = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s).

ถ้ามีอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่คงที่ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด (การเปลี่ยนแปลงขนาดท่อ) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย ณ พื้นที่หน้าตัดนั้นในลักษณะผกผัน (ตรงกันข้าม) กับการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด. หมายความว่า ถ้าพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น ความเร็วเฉลี่ยจะลดลง และถ้าพื้นที่หน้าตัดลดลง ความเร็วเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น. ลักษณะนี้คือ สมการของความต่อเนื่อง, ดังรูปที่ 29.



รูปที่ 29. สมการของความต่อเนื่อง.

$$Q = \frac{\pi (D_1)^2}{4} \bar{v}_1 = \frac{\pi (D_2)^2}{4} \bar{v}_2 = \frac{\pi (D_3)^2}{4} \bar{v}_3 \dots$$

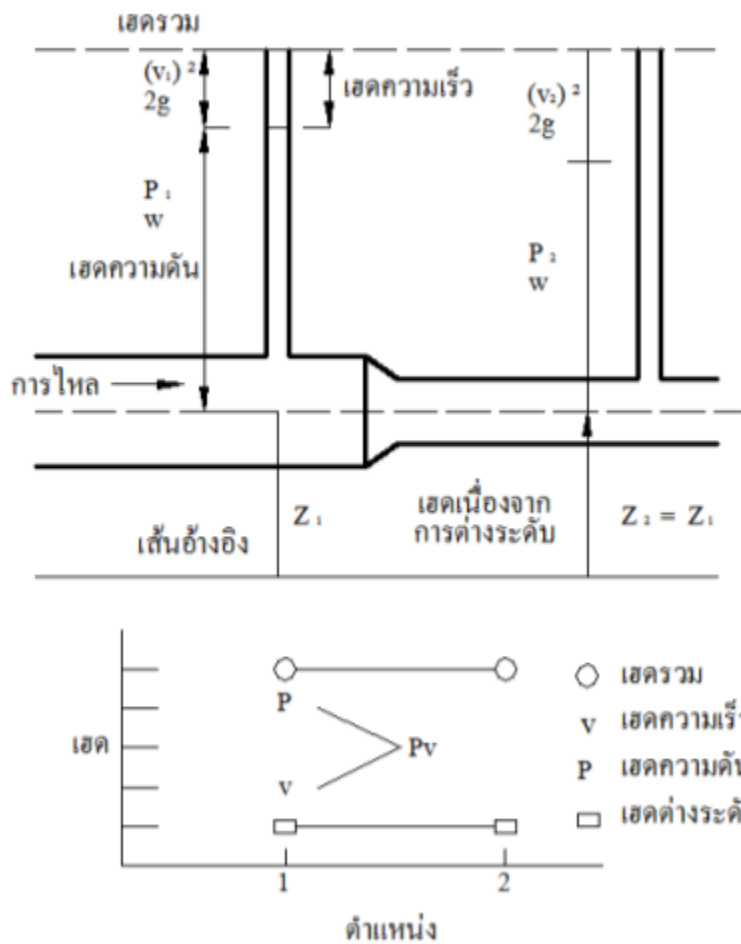
$$A = A_1 \bar{v}_1 = A_2 \bar{v}_2 = A_3 \bar{v}_3$$

โดยที่ $\bar{v}_1 < \bar{v}_2 < \bar{v}_3 \dots$

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง อัตราการไหลเชิงปริมาตรผ่านระบบท่อสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของท่อ ณ ตำแหน่งใดๆ, คูณด้วยความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งนั้น. ความสัมพันธ์นี้ถือเป็นความสัมพันธ์พื้นฐานของการทำงานสำหรับเครื่องมือวัดการไหลชนิดวัดความเร็วเฉลี่ยของของไหล. ดังนั้น หากทราบพื้นที่หน้าตัด ซึ่งคงที่ ณ หน้าตัดหนึ่งๆ ที่ไม่มีการเคลือบผิวและการกัดกร่อน, อัตราการไหลเชิงปริมาตรเป็นสัดส่วนตรงกับความเร็วจเฉลี่ย. อย่างไรก็ตาม การกัดกร่อนผนังท่อเกิดขึ้นอยู่เสมอ, ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องปรับเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดเมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง.

ทฤษฎีของเบอร์นูลลี (Bernoulli's theorem)

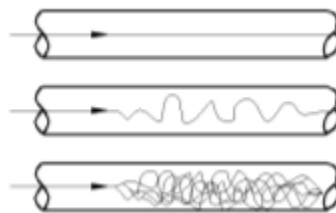
สมการของความต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่และความเร็วเฉลี่ยสำหรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต้องการค่าหนึ่งๆ. Daniel Bernoulli และคณะกล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วค่าหนึ่ง มีความสัมพันธ์ต่อผลของความดันในลักษณะการคงที่ของพลังงาน (Conversion of energy). โดยพบว่า พลังงานรวมซึ่งวัดในลักษณะความสูงที่เรียกว่า เฮด (Head) ดังรูปที่ 30, มาจากผลรวมของพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ในลักษณะเฮดความเร็ว (Velocity head) กับพลังงานศักย์ (Potential energy) ในลักษณะเฮดความดัน (Pressure head). อาจกล่าวอีกนัยหนึ่ง ถ้าพลังงานรวมมีค่าคงที่ (พลังงานไม่มีการเพิ่มเข้ามาหรือกำจัดออกไป), การเปลี่ยนแปลงความเร็วจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในทิศทางตรงข้ามกัน. นั่นคือ ถ้าความเร็วเพิ่ม ความดันจะลดลง และถ้าความเร็วลด ความดันจะเพิ่มขึ้น. ฉะนั้น สำหรับกรณีในพื้นที่หน้าตัดทางด้านปลายกระแสน้ำ (Downstream) ลดลง ดังรูปที่ 30, จะเป็นการเพิ่มความเร็วของของไหลให้สูงขึ้น ในขณะที่จะเป็นการลดความดันลงเป็นสัดส่วนกัน. คุณลักษณะดังกล่าวนี้ จะนำมาใช้กับเครื่องมือวัดการไหลชนิดความดันแตกต่างกันได้แก่ แบบออริฟิซ (Orifices), แบบเวนจูรี (Venturies), แบบต่อท่อไหล (Flow tubes), แบบนอซเซิลการไหล (Flow nozzles), แบบพิทอต (Pitots) และอื่นๆ.



รูปที่ 30. ทฤษฎีของเบอร์นูลลี.

งานของเรย์โนลด์ (Reynolds)

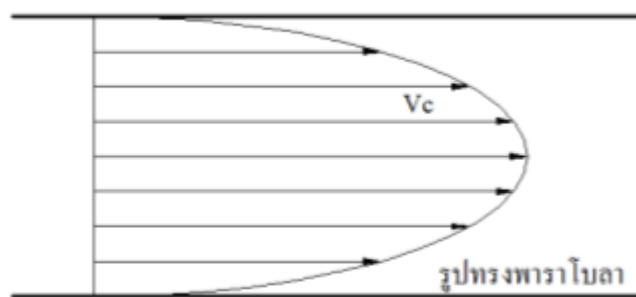
ปี ค.ศ. 1883 จากทฤษฎีของเบอร์นูลลี, Osborne Reynolds ได้ศึกษาถึงธรรมชาติของลักษณะการไหลในท่อ ด้วยการฉีดสีย้อมฟ้าเข้าสู่กระแสการไหลและสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นว่า สีเคลื่อนที่ไปอย่างไร, พบว่า ณ ความเร็วที่ต่ำ (และความหนืดสูงขึ้น) สีจะมีแนวทางเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากจุดที่ฉีดเข้าไป ดังรูปที่ 31 บน, เรียกสภาวะการไหลแบบนี้ว่า การไหลตรง (Direct flow).



รูปที่ 31. ลักษณะการไหลในย่านต่างๆ สามรูปแบบ.

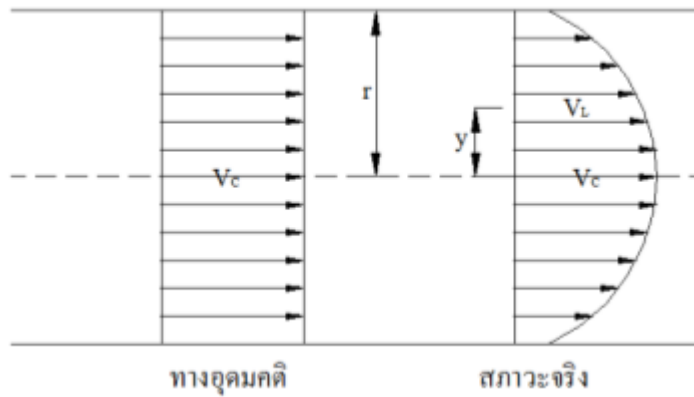
ต่อมาเรียกว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) เนื่องจากการไหลลักษณะนี้เคลื่อนที่ราวกับว่ามันประกอบด้วยของไหลเป็นชั้นๆ (Lamination). จากนั้น ได้เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงความเร็วหนึ่ง พบว่า สีมินิวทางเคลื่อนที่คดเคี้ยว แต่ยังอยู่ในแนวเส้นตรงเดิมดังรูปที่ 31 กลาง, ซึ่งแสดงถึงความไม่เสถียรภาพ. เมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นอีกจนถึงความเร็วหนึ่ง พบว่า สีกระจายออกอย่างทันทีทันใดตลอดทั่วทั้งกระแสไหลดังรูปที่ 31 ล่าง, เรียกสภาวะการไหลแบบนี้ว่า การไหลคดเคี้ยว (Sinuous flow), ซึ่งต่อมาเรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow).

งานของเรย์โนลด์แสดงให้เห็นว่าในการไหลแบบราบเรียบ แรงความหนืด (Viscous forces) (ความเสียดทานภายในของของไหล) จะมีพฤติกรรมที่เด่น. จากการวิเคราะห์ความเร็ว ณ ตำแหน่งใดๆ ตลอดหน้าตัดท่อ, พบว่า โปรไฟล์ (Profile) ความเร็วมีลักษณะเป็นรูปทรงพาราโบลา มีความเร็วที่เส้นศูนย์กลางท่อมักเป็น 2 เท่า ของความเร็วเฉลี่ย, ดังรูปที่ 32.



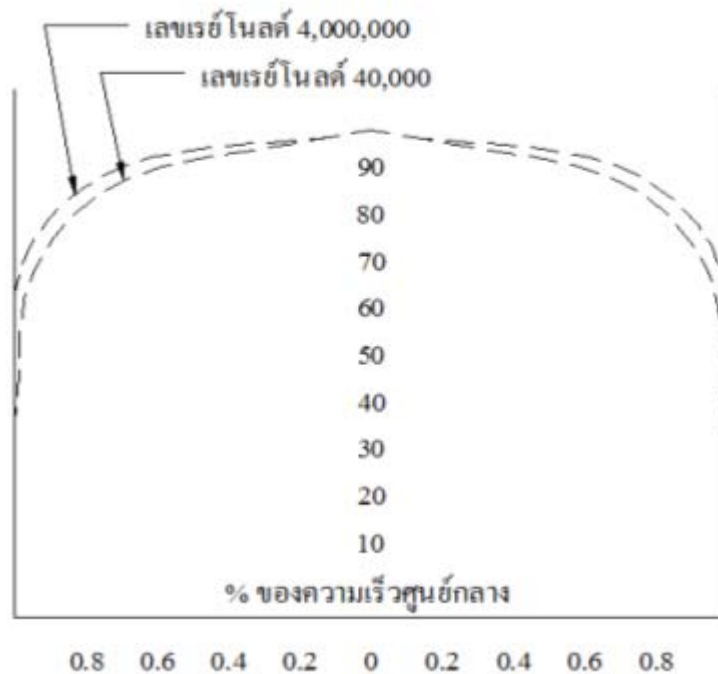
รูปที่ 32. ลักษณะโปรไฟล์ความเร็วของการไหลแบบราบเรียบ.

ส่วนในการไหลผ่านปั่นป่วน (Turbulent regime) แรงความเฉื่อย (Inertial forces) (แรงพลวัต : Dynamic forces) จะมีพฤติกรรมที่เด่น, ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยแรงทางข้างและตามขวาง อันเป็นสาเหตุให้สีเกิดการกระจายตัวอย่างทันทีทันใดเข้าสู่กระแสการไหล. แรงทางข้างเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดการกวนผสมของสีเข้าสู่กระแสการไหล และเป็นผลให้โปรไฟล์ความเร็วของการไหลลักษณะนี้เปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย. ลักษณะของโปรไฟล์จึงมีลักษณะค่อนข้างโค้งมน ดังรูปที่ 33 ขวา. โดยระยะจากผนังท่อ ความหนาของชั้นของเขต (Boundary layer) เป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติของของไหลและความหยาบผนังท่อ.



รูปที่ 33. โปรไฟล์ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนเชิงเปรียบเทียบ.

สำหรับความโค้งมนจะมากหรือน้อยจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความหนืดของของไหล, ซึ่ง Reynolds ได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ที่เรียกว่า เลขเรย์โนลด์ ดังรูปที่ 34, ซึ่งสามารถใช้กำหนดให้ทราบได้ว่า การไหลหรือกำลังไหลอยู่ในย่านใด เช่น ย่านการไหลแบบราบเรียบ, ย่านการไหลแบบปั่นป่วน หรือย่านการไหลช่วงเปลี่ยนแปลง (Transition) จากราบเรียบไปสู่ความสัมพันธ์แบบไร้หน่วยของเลขเรย์โนลด์ (Re).



รูปที่ 34. โปรไฟล์ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน.

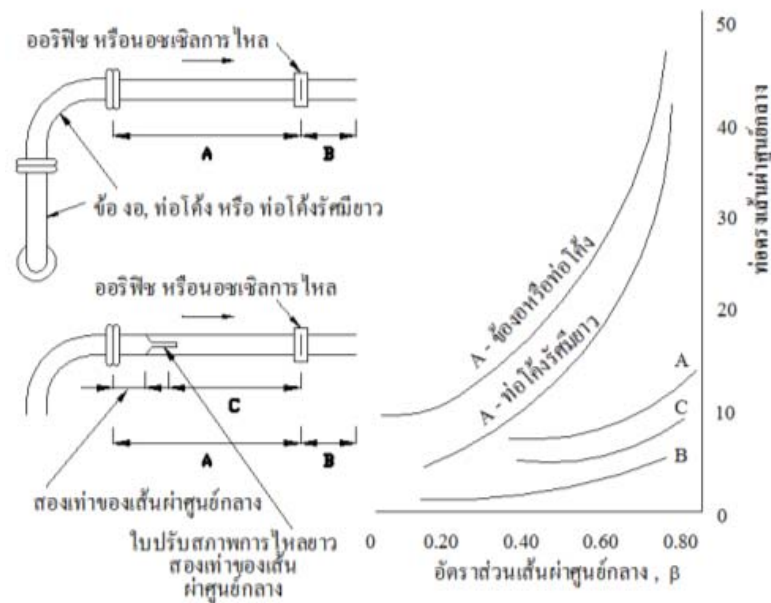
Re	=	$\frac{\rho v D}{\mu}$
Re	=	เลขเรย์โนลด์,
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล,
D	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล,
v	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล,
μ	=	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล.

ในกรณีของการไหลภายในท่อ พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าตั้งแต่ 4,000 ขึ้นไปโปรไฟล์จะโค้งมนและการไหลเป็นแบบปั่นป่วน. เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าตั้งแต่ 2,000 ลงมา โปรไฟล์จะเป็นรูปทรงพาราโบลาและการไหลเป็นแบบราบเรียบ. ส่วนเลขเรย์โนลด์ที่อยู่ระหว่าง 2,000 ถึง 4,000 คือย่านเปลี่ยนแปลง. อย่างไรก็ตาม โปรไฟล์การไหลจะมีลักษณะสมมาตรในทางทฤษฎีเท่านั้น. ในทางปฏิบัติในขณะที่การไหลเคลื่อนที่ผ่านระบบท่อ โปรไฟล์จะไม่สมมาตร ดังรูปที่ 32 และ 33, แต่จะผิดรูปไปเพียงใดขึ้นอยู่กับระบบท่อที่ของไหลผ่าน. รูปที่ 35 แสดงให้เห็นถึงการผิดรูปไปของโปรไฟล์การไหลที่มีผลเนื่องจากการไหลผ่านช่องอ 90 องศาเดียว. ขณะที่ของไหลไหลผ่านช่องอกระแสการไหลจะเร่งตัวด้านซิดผนังด้านนอกและหน่วงตัวลงทางด้านซิดผนังด้านใน. จากนั้น จึงจะค่อยๆ ปรับตัวเข้าสู่โปรไฟล์ปกติ เมื่อระยะทางการไหลผ่านไประยะหนึ่ง.



รูปที่ 35. ผลกระทบของช่องอเดียวต่อโปรไฟล์การไหล.

ดังนั้น หากมีความต้องการติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลต่อจากช่องอหรือระบบท่อลักษณะอื่นๆ ที่อาจจะทำให้โปรไฟล์ผิดรูปไป ต้องทิ้งระยะห่างออกมาช่วงหนึ่งเสมอ. นอกจากนี้ ผลทางด้านระบบท่อปลายกระแสมีผลเช่นกัน. การติดตั้งเครื่องมือวัดการไหลรูปแบบอื่นๆ ที่มีผลจากเลขเรย์โนลด์ ต้องมีระยะห่างที่จำเป็น.



รูปที่ 36. ระยะห่างที่จำเป็นด้านต้นและปลายกระแสน้ำสำหรับออริฟิซหรือนอซเซลการไหล.

เครื่องมือวัดแบบวัดพื้นที่ (Area flow meter)

เครื่องมือวัดการไหลแบบวัดพื้นที่ (Area flow meter หรือ Variable flow meter) มีใช้งานในอุตสาหกรรมมานานมากชนิดหนึ่ง. เป็นเครื่องมือวัดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางรูปแบบหนึ่ง เนื่องจากราคาไม่แพงและเป็นเครื่องมือวัดที่ได้รับการออกแบบให้มีความดันแตกต่างระหว่างทางเข้าและทางออกของเครื่องมือวัดค่อนข้างคงที่. แม้ว่าอัตราการไหลจะเปลี่ยนไป, ทำให้อัตราการไหลที่วัดได้แปรเปลี่ยนไปตามพื้นที่หน้าตัดการไหลเป็นหลัก, อันเป็นที่มาของชื่อเครื่องมือวัดชนิดนี้.

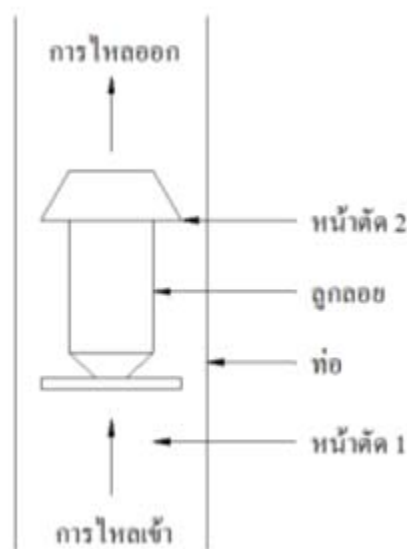
ครั้งแรกของการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดชนิดนี้ เพื่อให้สามารถมองเห็นอัตราการไหลได้. ต่อมา จึงได้พัฒนาให้ทำหน้าที่อื่นๆ เช่น การส่งผ่านสัญญาณ (transmission), การเตือน (alarm), การบันทึก (recording) และการทำหน้าที่ดังกล่าวทั้งหมดรวมกัน. ขนาดของเครื่องมือวัดชนิดนี้ มีใช้งานตั้งแต่ขนาดเล็กเพียง 1/16 นิ้ว จนถึง 12 นิ้ว, อัตราการไหลมีตั้งแต่ต่ำกว่า 1 ซีซี / นาที ถึง 3,000 แกลลอน/นาที หากใช้งานกับของเหลว และประมาณ 30 ลิตร/นาที ถึง 3,000 scfm หากใช้งานกับอากาศ.

เนื่องจากเครื่องมือวัดชนิดนี้ออกแบบสำหรับใช้งานในเส้นท่อ (in-line device), จึงได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้กับอัตราความดันในช่วงกว้างต่อกับเส้นท่อได้หลายรูปแบบ และมีโครงสร้างที่ทำจากวัสดุหลากหลายชนิด.

หลักการทำงาน

เครื่องมือวัดการไหลแบบวัดพื้นที่ ในความเป็นจริงถือเป็นเครื่องมือวัดแบบวัดความต่างศักย์หรือความดันแตกต่าง (Differential pressure flow meter) ชนิดหนึ่ง, แต่ถือเป็นชนิดพิเศษออกไปจากการที่เป็นเครื่องมือวัดที่มีความดันแตกต่างคงที่ตลอดช่วงการไหล, ซึ่งต่างกับเครื่องมือวัดแบบวัดความต่างศักย์ปกติ เช่น แบบออริฟิซ (Orifice), ที่ความดันตกคร่อมเครื่องมือวัดจะแปรผันไปกับค่าอัตราการไหลยกกำลังสอง, เป็นผลให้เมื่ออัตราการไหลยิ่งเพิ่มมากขึ้น. ความดันตกคร่อม (หรือความดันแตกต่างระหว่างทางเข้ากับทางออกของเครื่องมือวัด) จะเพิ่มมากขึ้นเป็นเงาตามตัว และในกรณีที่อัตราการไหลต่ำมาก กลับทำให้ค่าความเที่ยงตรง (accuracy) ของเครื่องมือวัดผิดพลาดมากขึ้น. เครื่องมือวัดการไหลแบบวัดพื้นที่จะช่วยปรับแก้ข้อด้อยหรือข้อจำกัดในส่วนนี้ได้.

สำหรับหลักการการทำงานที่ทำให้เครื่องมือวัดชนิดนี้มีความดันแตกต่างคงที่ตลอดช่วงการไหล อาศัยสมการพื้นฐานได้แก่ สมการของเบอร์นูลลีและสมการความต่อเนื่อง. ถ้ากำหนดให้เทอมต่างๆ ดังนี้ :



รูปที่ 37. หลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดแบบวัดพื้นที่.

โดยที่ w = อัตราการไหล (น้ำหนัก/เวลา),
 Q = อัตราการไหล (ปริมาตร/เวลา),
 C = สัมประสิทธิ์การปล่อยออก (Coefficient of discharge),
 A_2 = พื้นที่หน้าตัด ณ หน้าตัด 2,
 g = ค่าแรงโน้มถ่วง,
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล,
 ρ_f = ความหนาแน่นของวัสดุลูกลอย,
 W_f = น้ำหนักของลูกลอย,

$$\text{จะได้ } W = CA_2 \sqrt{\frac{2g\rho W_f(\rho_f - \rho)}{\rho_f}}$$

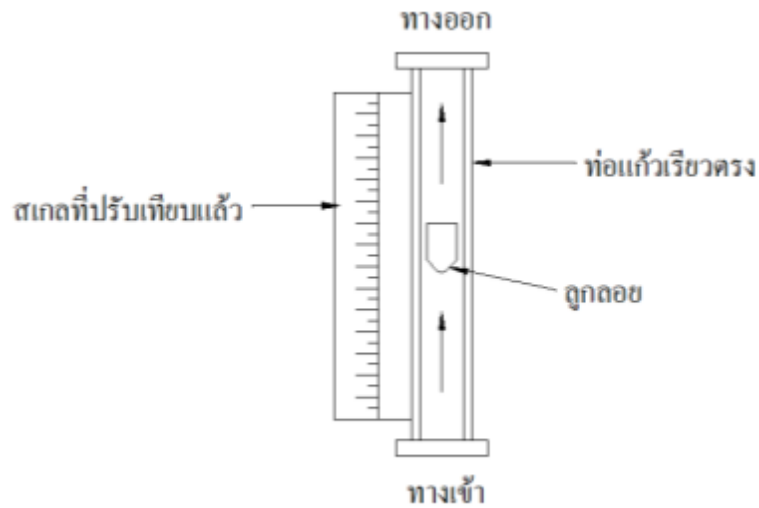
$$Q = CA_2 \sqrt{\frac{2g W_f(\rho_f - \rho)}{\rho}}$$

เนื่องจากค่าอื่นๆ จะคงที่ในเครื่องมือวัดอันหนึ่ง ยกเว้น A_2 , ดังนั้น Q แปรเปลี่ยนตาม A_2 เท่านั้น.

รูปแบบของเครื่องมือวัดชนิดนี้มีด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่ :

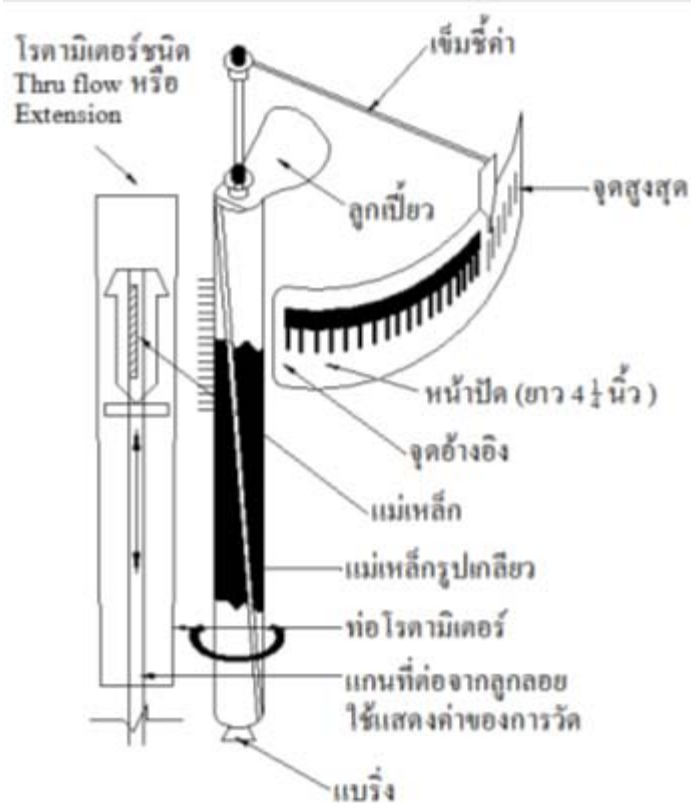
1. แบบโรตاميเตอร์ (Rota meter),
2. แบบออริฟิซกับปลั๊กทรงกรวย (Orifice and tapered plug meter),
3. แบบลูกสูบ (Piston-type meter).

แบบโรตاميเตอร์ (Rota meter) เป็นเครื่องมือวัดที่ประกอบไปด้วยท่อทรงรียาวตรงที่มีปลายด้านล่างเล็กกว่าปลายด้านบน. โดยปกติเป็นท่อแก้วใส เพื่อให้สามารถอ่านได้จากตำแหน่งของลูกลอยที่ลอยขึ้นสูงตามอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่าน โรตاميเตอร์ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากการไหลลดลง. รูปที่ 38 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบที่สำคัญของโรตاميเตอร์ ซึ่งนอกจากท่อเรียวยาวตรงและลูกลอยแล้ว, ได้แก่ สเกลบอกอัตราการไหลตามตำแหน่งของลูกลอย.



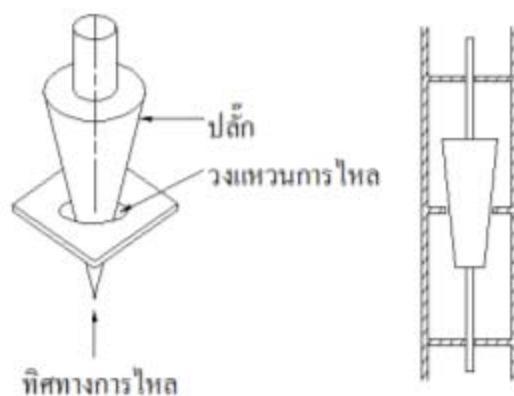
รูปที่ 38. ส่วนประกอบของโรตاميเตอร์.

นอกจากนี้ โรตاميเตอร์สามารถออกแบบพิเศษสำหรับใช้งานในจุดที่การใช้แบบท่อแก้วใสไม่สะดวก ด้วยการใช้ท่อโลหะแทนท่อแก้ว. ดังนั้น วิธีอ่านค่าจึงต้องออกแบบใหม่ เนื่องจากไม่สามารถมองตุ๊กลอยได้โดยตรง. การออกแบบจะนำแม่เหล็กมาฝังอยู่ในตุ๊กลอยและต่อก้านตุ๊กลอยออกไปทั้งด้านบนและล่าง เพื่อทำเป็นแกนยึดตุ๊กลอยให้เคลื่อนที่อยู่ตรงศูนย์กลางของท่อ. จากนั้นข้างๆ ท่อโลหะด้านนอกจะนำแผ่นแม่เหล็กรูปเกลิวยมาจัดวางขนานกับท่อโลหะ โดยแผ่นแม่เหล็กนี้สามารถหมุนได้โดยอิสระอยู่กับแบริ่ง ที่ยึดด้านบนกับด้านล่างของแผ่นแม่เหล็ก. ดังนั้น เมื่อตุ๊กลอยที่ฝังแม่เหล็กเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตามอัตราการไหลของของไหลแผ่นแม่เหล็กรูปเกลิวยนี้ จะหมุนไปตามแม่เหล็กของตุ๊กลอยจากแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน. ฉะนั้น ถ้าต่อเข็มสำหรับอ่านค่า ณ ส่วนบนของแผ่นแม่เหล็กรูปเกลิวยนี้ และจัดทำหน้าปัดสำหรับอ่านค่าเข้ากับเข็มนี้จะสามารถอ่านค่าอัตราการไหลออกมาได้ ดังรูปที่ 39.



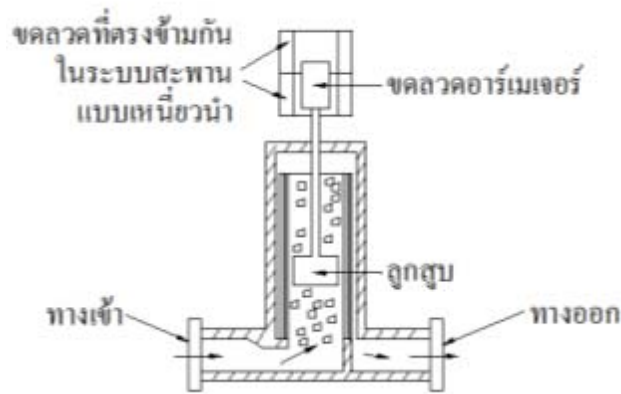
รูปที่ 39. โรตاميเตอร์แบบท่อโลหะ.

แบบออริฟิซกับปลั๊กทรงกรวย (Orifice and tapered plug meter) เป็นเครื่องมือวัดที่มีรูออริฟิซติดอย่างถาวรอยู่ภายในท่อทรงกระบอกตรง, โดยมีลูกลอยเป็นปลั๊กทรงกรวยหรือกรวยตัดเคลื่อนที่ขึ้นลงอยู่ภายใน ดังรูปที่ 40. สำหรับอัตราการไหลสามารถอ่านจากตำแหน่งของลูกลอยได้โดยตรงเช่นเดียวกับแบบโรตاميเตอร์ ท่อแก้วใส.



รูปที่ 40. แบบออริฟิซกับปลั๊กทรงกรวย.

แบบลูกสูบ (Piston-type meter) เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการเคลื่อนที่ของลูกสูบภายในทรงกระบอกที่มีรูเรียงกันอยู่ตามผนังของทรงกระบอกนั้น โดยมีปลอกทรงกระบอกครอบอยู่อีกชั้นหนึ่ง ดังรูปที่ 41. อัตราการไหลจะวัดตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ขึ้นลงของลูกสูบ, ซึ่งจากลักษณะการออกแบบลักษณะนี้ ทำให้เครื่องมือวัดชนิดนี้สามารถวัดอัตราการไหลของของไหลที่มีความหนืดสูงได้ดี เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง, น้ำมันดิบ, สารเคมีเหลวทั้งหลาย. นอกจากนี้ ยังสามารถใช้งานกับของไหลที่มีฤทธิ์กัดกร่อน รวมทั้งเป็นเครื่องมือวัดที่ง่ายต่อการติดตั้ง.



รูปที่ 41. แบบลูกสูบ

เนื่องจาก เครื่องมือวัดการไหลแบบวัดพื้นที่ใช้หลักการสมดุลแรงระหว่างแรงโน้มถ่วงกับแรงของไหล, ดังนั้น การติดตั้งจึงต้องให้เครื่องมือวัดอยู่ในตำแหน่งตั้งตรง. อย่างไรก็ตาม อาจมีการออกแบบให้ใช้สปริงช่วยแทนแรงโน้มถ่วงได้ ซึ่งสามารถติดตั้งในแนวนอนได้.

การประยุกต์ใช้งาน

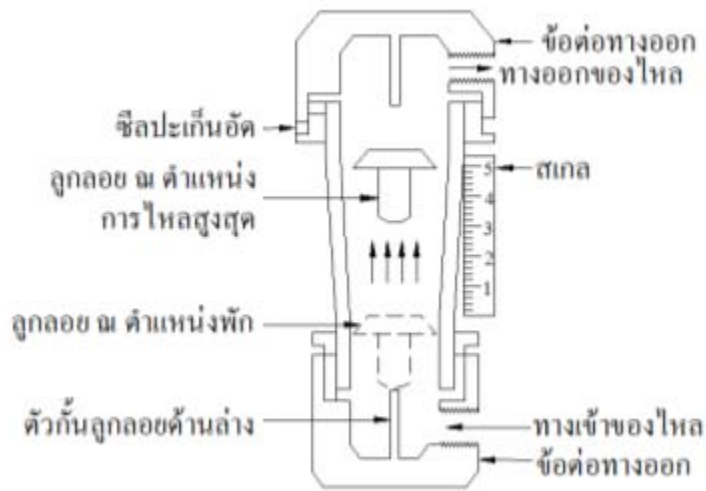
เครื่องมือวัดชนิดนี้สามารถใช้วัดของไหลได้ทั้งของเหลวหรือก๊าซ. อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่า ในทางทฤษฎีจะไม่จำกัดการใช้งับของไหลที่มีความหนืดใดๆ แต่โดยทั่วไปในการพิจารณาการเปรียบเทียบมาตรฐานในทางปฏิบัติ จะใช้กับของไหลในระดับความหนืดที่ไม่เกินหลักร้อย Centipoises (Cp). นอกจากนี้ที่ได้รับการออกแบบพิเศษที่สามารถใช้งานได้กับ สเลอรี (Slurry) ความเข้มข้นต่ำ.

นอกจากนี้ เครื่องมือวัดชนิดนี้เหมาะที่จะใช้งานกับท่อที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก ตั้งแต่ 2 นิ้ว ลงมา เนื่องจากราคาจะไม่แพง, แต่ถ้าหากขนาดโตขึ้น ค่าใช้จ่ายจะสูงกว่าเครื่องมือวัดแบบอื่นๆ.

การใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ :

1. ท่อ bubble ใช้ป้อนสำหรับการวัดระดับแบบท่อจุ่ม (dip tube).
 - 1) การระบาย (purge) ป้อนสู่เส้นท่อวัดความดันต่อกับเครื่องมือวัดชนิดความดันแตกต่าง เพื่อป้องกันของไหลในกระบวนการผลิตจากการย้อนกลับสู่เส้นท่อวัดความดัน.
 - 2) การระบายป้อนสู่ถัง หรือถังรับแรงดัน เพื่อคลุมของเหลวด้วยก๊าซเฉื่อย.
 - 3) การระบายไหลสู่ซีลกันรั่วของก๊าซ.
 - 4) การวัดของไหลกระบวนการผลิตที่มีการไหลต่ำ สำหรับการควบคุมแบบเป็นช่วงหรือแบบต่อเนื่อง.
 - 5) การวัดอัตราการไหลสำหรับปรับตั้งการไหลที่จำเป็นต่อเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีหลายๆ ชนิด.
 - 6) การเตือนการไหลต่ำหรือสูงของหอระบายความร้อน หรือเส้นท่อน้ำมันหล่อลื่น เพื่อป้องกันอุปกรณ์ที่สำคัญหรือราคาแพงจากสภาวะความร้อนเกิน หรือการขาดการหล่อลื่น.
 - 7) การส่งผ่านสัญญาณการไหลสำหรับการแจ้งเตือนระยะไกล หรือการทำงานของวงรอบการควบคุม (control loop).
 - 8) การปรับตั้งค่า และ/หรือ การติดตั้งตามผลอัตราการป้อนต่อระบบกรอง.
 - 9) การวัดปริมาณของไหลต่างๆ เช่น อากาศ, น้ำใช้ในโรงงาน, น้ำหล่อเย็น, ก๊าซเชื้อเพลิง, หรือไอน้ำ เพื่อวัตถุประสงค์ในการรวบรวมการใช้งาน, การจัดการค่าใช้จ่าย และการอนุรักษ์พลังงาน, เป็นต้น.
 - 10) การวัดการไหลในห้องปฏิบัติการ.
 - 11) เครื่องมือวัดการไหลทดสอบสำหรับการทดสอบวาล์ว, ปั๊ม, เครื่องยนต์ต้นกำลัง, เป็นต้น.

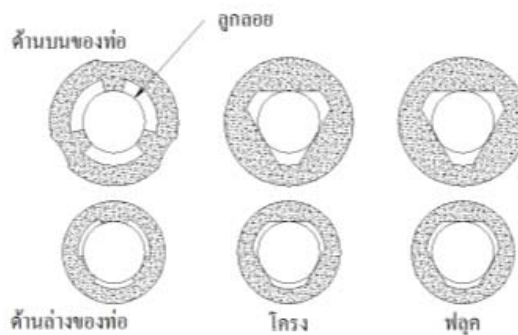
การวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะเครื่องมือวัดแบบโรตารีเมเตอร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานของเครื่องมือวัดชนิดกลุ่มนี้และได้ถูกนำมาใช้ในการวิจัยนี้ด้วย. เครื่องมือวัดแบบโรตารีเมเตอร์เป็นเครื่องมือวัดที่ไม่มีความซับซ้อน, ซึ่งมีลักษณะเป็นอุปกรณ์เชิงกลอย่างง่าย ๆ, ราคาไม่แพง. ประกอบด้วยส่วนท่อ, ลูกกลอย และตัวเรือน, และส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ สเกล, ข้อต่อ และซีลกันรั่ว, ดังรูปที่ 42.



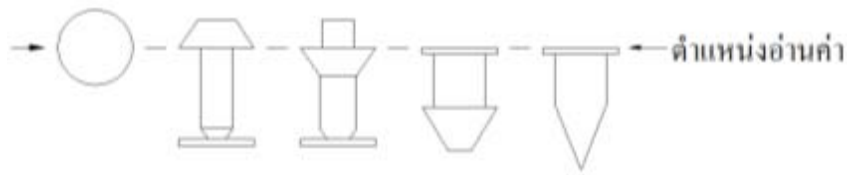
รูปที่ 42. ส่วนประกอบของโรตามิเตอร์.

ท่อ (Tube) โดยทั่วไป ท่อของโรตามิเตอร์ ได้แก่ ท่อแก้วใสที่มีความยาวขนาด 3, 5, 6, 10 นิ้ว และในบางกรณี จะเป็น 24 นิ้ว. อย่างไรก็ตาม จากธรรมชาติที่แตกเสียหายง่ายของแก้ว จึงจำเป็นที่จะต้องระมัดระวังในการเลือกใช้, การติดตั้ง และการปฏิบัติ. ดังนั้น การศึกษาข้อมูลต่างๆ ของผู้ผลิตในการติดตั้งและการปฏิบัติ จึงเป็นสิ่งจำเป็น.

ลูกลอย (Float) ลูกลอยที่ใช้งานกับโรตามิเตอร์สามารถทำมาจากวัสดุได้หลากหลายชนิด แต่ต้องมีความหนาแน่นมากกว่าความหนาแน่นของของไหล, ถ้าเลือกเครื่องมือวัดที่เป็นชนิดที่ต้องคำนึงถึงแรงโน้มถ่วง และเนื่องจากอัตราการไหลในท่อที่กำหนดไว้ นั้น ขึ้นอยู่กับทั้งน้ำหนักของลูกลอยและรูปร่างของลูกลอย. ดังนั้น ในการเลือกใช้ลูกลอย จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ ได้แก่ อัตราการไหล, ความหนืดของการไหล, ความดันลด, ราคา และความทนทาน. รูปที่ 43 และ 44 แสดงถึง โครงรับลูกลอยและรูปร่างของลูกลอย.



รูปที่ 43. โครงรับลูกลอย.



รูปที่ 44. ลักษณะรูปร่างลูกลอย.

ตัวเรือน (body) ทำหน้าที่ยึดชิ้นส่วนของเครื่องมือวัดเข้าด้วยกันและกำหนดวิธีในการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดกับเส้นท่อด้วย. ดังนั้น ตัวเรือนต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ เพื่อให้สามารถรับความดันภายใน รวมทั้งแรงภายนอกจากความเครียดของท่อและการสั่นสะเทือนได้. ในบางลักษณะ ตัวเรือน จะออกแบบให้เป็นส่วนขอบเขตความดัน (pressure boundary) และจมอยู่กับของไหลในกระบวนการผลิต, ซึ่งกรณีนี้ ตัวเรือนต้องทำจากวัสดุที่สามารถเข้ากันได้กับของไหลในกระบวนการผลิต. แต่โดยทั่วไปตัวเรือนมีลักษณะเป็นท่อแก้ว จึงต้องมีพลาสติกใสหุ้มคลุมไว้ เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุที่อาจทำให้ท่อแก้วแตกเสียหายได้ง่าย.

ข้อต่อ (end filling/ connection) เนื่องจากเครื่องมือวัดชนิดนี้ใช้งานในลักษณะเส้นท่อ (in-line device), ดังนั้น ข้อต่อของอุปกรณ์ต้องสามารถต่อเข้ากับข้อต่อของท่อได้. นอกจากนี้ ข้อต่อต้องสามารถทนแรงดันของระบบโดยที่ไม่เกิดการรั่วไหลด้วย และต้องสามารถรับน้ำหนักของเครื่องมือวัดได้ด้วย. โดยทั่วไป สำหรับท่อขนาดเล็กมักใช้ข้อต่อแบบเกลียว. สำหรับท่อที่มีขนาดตั้งแต่ 2 นิ้วขึ้นไป มักใช้ข้อต่อแบบหน้าแปลน ในระดับชั้น ANSI CI 150 และ CI 300 เป็นส่วนใหญ่. อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อแบบอื่นๆ มีใช้งานเช่นกัน เช่น ท่ออ่อน (hose), ตัวเชื่อมแบบผนึกการอัด (compression seal connector), เป็นต้น.

ซีลกันรั่ว (seal) เป็นอุปกรณ์กันรั่วระหว่างท่อ โรตاميเตอร์กับข้อต่อมักใช้แหวนโอริง (O-ring) หรือปะเก็นอัด (packing). โดยทั่วไปแหวนโอริง ใช้เมื่อของไหลไม่มีสภาวะกัดกร่อนต่อปลายข้อต่อ, ส่วนปะเก็นอัดสามารถใช้ที่สภาวะกัดกร่อนเล็กน้อยได้ รวมทั้งอาจใช้ซีลเทฟลอนได้.

โครงสร้างของวัสดุ

ท่อ แก้วเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในการใช้งาน โรตاميเตอร์. อย่างไรก็ตาม ท่อที่ทำจากเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมหรือโลหะที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กอื่นๆ รวมทั้งท่อบุเทฟลอนและท่อพีวีซี มีใช้งานเช่นกัน. นอกจากนี้ ยังมีพลาสติกประเภทโพร่งใสอื่นๆ เช่น อะคริลิก, พอลิคาร์บอเนต หรือ พอลิซัลฟอน เป็นต้น.

ลูกลอย เนื่องจากรูปร่าง, เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของลูกลอย เป็นสิ่งสำคัญมากต่อความเที่ยงตรงในการวัด. ดังนั้น ลูกลอยต้องเป็นวัสดุที่เข้ากับของไหลที่ต้องการวัด, ไม่เกิดการกัดกร่อน. โดยทั่วไปวัสดุทำลูกลอยจะเป็นเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม. อย่างไรก็ตาม ถ้าของไหลที่ต้องการวัดอาจมีผลต่อการกัดกร่อนวัสดุเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม จะต้องใช้วัสดุอื่นๆ แทน เช่น แก้ว หรือเซฟไฟร์. สำหรับลูกลอยรูปลูกบอลอาจใช้วัสดุประเภทพีวีซี, เทฟลอน, เฮสเทลลอย, โมเนล, แทนทาลัม และไทเทเนียม.

ข้อต่อ/ตัวเรือน โดยทั่วไปใช้วัสดุประเภททองเหลือง, เหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม. นอกจากนี้ อาจเป็นเหล็กหล่อหรือโลหะผสมนิกเกิลโครมสูง และสำหรับโรตاميเตอร์หลอดแก้วใส อาจใช้ข้อต่อที่ทำจากพีวีซี และไคนาร์ (Kynar).

ซิลกันร้ว ทำไปวัสดุที่ทำซิลกันร้ว ได้แก่ นิโอโพรนหรือเทฟลอน หากเป็นปะเก็นอัด และไนไตรล หรือไวตันหากเป็นปะเก็นแหวนโอรัง.

สมรรถนะเครื่องวัดแบบโรตاميเตอร์

ความเที่ยงตรง โดยปกติโรตاميเตอร์มีความเที่ยงตรงสูงมาก อยู่ในระดับร้อยละ 2 ของอัตราการไหลเต็มพิกัด, เนื่องจากเป็นเครื่องมือวัดที่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่เพียงชิ้นเดียว คือ ลูกลอย และเป็น การเคลื่อนที่ที่ปราศจากแรงเสียดทาน. เมื่อเลือกเครื่องมือวัดการไหลแบบวัดพื้นที่ที่มีความเที่ยงตรงร้อยละ 2 ของอัตราการไหลเต็มพิกัด, ต้องระลึกไว้ว่า ความเที่ยงตรงในเทอมของเปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลจะลดลง ณ อัตราการไหลที่ลดลง, เช่น เปอร์เซ็นต์ของความเที่ยงตรงที่อัตราการไหลเพียงครึ่งหนึ่งของอัตราการไหลเต็มพิกัด (50 %) ของสเกลมีค่าเท่ากับร้อยละ 4 ของอัตราการไหล และที่ระดับอัตราการไหล หนึ่งส่วนสี่ (25 %) ของสเกล มีค่าเท่ากับร้อยละ 8 ของอัตราการไหล เป็นต้น.

ความเป็นเชิงเส้น โรตاميเตอร์มีความดันตกคร่อมคงที่ตลอดช่วงอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลง ด้วยการให้ท่อเครื่องมือวัดเร็วหรือทรงกระบอกที่มีรูตลอดผนังท่อ, ทำให้กราฟอัตราการไหลที่เทียบกับการเคลื่อนที่มีลักษณะค่อนข้างเป็นเชิงเส้น. ประกติจะเบี่ยงเบนออกจากความเป็นเชิงเส้นประมาณร้อยละ 5. หากเสริมด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณ สามารถปรับแต่งความ เป็นเชิงเส้นของสัญญาณออกเทียบกับการไหลให้ได้ใกล้เคียงมากขึ้น. โดยอาจจะปรับได้ในระดับร้อยละ 1 ของค่าที่เบี่ยงเบนออกไป.

ช่วงการไหล ปัจจัยที่กำหนดช่วงการไหลในขนาดเครื่องวัด ได้แก่ 1) พื้นที่ของออริฟิซ, 2) รูปทรงของลูกกลอย, 3) น้ำหนักของลูกกลอย. สำหรับอัตราการไหลสูงสุดโดยทั่วไปของโรตารีมิเตอร์ ตามตารางที่ 1, ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางระบุขนาดต่างๆ และช่วงการไหลของโรตารีมิเตอร์โดยปกติ คือ 10 :1.

ตารางที่ 1. ช่วงของอัตราการไหลสูงสุด

ขนาดท่อ (นิ้ว)	ชนิดของไหล น้ำ	ชนิดของไหล อากาศ
1/8	0.50 - 200 cc/min	50 - 7,500 scc/min
1/4	100 - 2,000 cc/min	4,000 - 34,000 scc/min
3/8	0.13 - 0.55 gm	0.75 - 2.4 scfm
1/2	0.25 - 4.0 gpm	1 - 20 scfm
3/4	1.9 - 5.0 gpm	8 - 20 scfm
1	4.0 - 20 gpm	20 - 45 scfm
1 1/2	9.0 - 50 gpm	38 - 112 scfm
2	20.0 - 100 gpm	80 - 200 scfm

อัตราความดันสูงสุด อัตราความดันของท่อแก้วของการวัดเป็นฟังก์ชันกับขนาดท่อระบุท่อที่มีขนาดโตจะทนความดันได้น้อยกว่าท่อขนาดเล็ก ในขณะที่มีความหนาเท่ากัน อัตราความดันที่ทนได้ของเครื่องมือวัดขนาดต่างๆ ตามตารางที่ 2.

ตารางที่ 2. อัตราความดันโดยทั่วไปสำหรับเครื่องมือวัดแบบหลอดแก้ว

ขนาดท่อ (นิ้ว)	อัตราความดันสูงสุด	
	psig	kPa
1/16 - 1/4	250 - 500	1,724 - 3,448
1/2	300	2,069
3/4	200	1,379
1	180	1,241
1 1/2	130	896
2	100	690
3	70	483

อัตราอุณหภูมิ อุปสรรคการใช้งานเครื่องมือวัดได้แก่ ย่านการวัดที่อุณหภูมิสูง. เนื่องจากซีลกันรั่วหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องในการใช้งานอัตโนมัติอาจเสื่อมสภาพได้. โดยทั่วไปอุณหภูมิสูงสุดกำหนดไว้ ดังนี้ :

- เครื่องวัดแบบหลอดแก้ว ประมาณ 120-170⁰ซ.
- เครื่องวัดแบบท่อโลหะใช้เฉพาะคู่อัตราการไหล ประมาณ 200-260⁰ซ.
- เครื่องวัดแบบท่อโลหะใช้เป็นทรานสมิตเตอร์หรือเตือนประมาณ 170-230⁰ซ.

ความหนืด เนื่องจากความหนืดมีผลโดยตรงต่อลูกกลอย หรือลูกสูบในการเคลื่อนที่ เครื่องมือชนิดนี้จึงใช้งานได้กับความหนืดที่มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง. ตามตารางที่ 3 แสดงค่าสูงสุดของความหนืดที่สามารถใช้งานได้กับโรตารีเมตรแบบหลอดแก้ว.

ตารางที่ 3. ค่าจำกัดความหนืดโดยทั่วไปที่ใช้กับลูกกลอย

ขนาดท่อ (นิ้ว)	ค่าจำกัดความหนืด, Centipoises (Cp)
1/2	2.0 - 7.5
3/4	7.5 - 15.0
1	15.0 - 20.0
1 1/2	20.0 - 35.0
2	35.0 - 50.0

ความดันลด ค่าความดันลดรวมในเครื่องมือวัดแบบวัดพื้นที่ คือ ผลรวมของความดันลดคร่อมลูกกลอยซึ่งคงที่ และความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานผ่านข้อต่อและตัวเรือนซึ่งไม่คงที่. สำหรับความดันลดที่แสดงโดยผู้ผลิต ได้แก่ การสูญเสียรวมคร่อมเครื่องมือวัด ณ การไหล 100 %. อย่างไรก็ตาม ในช่วงการไหลที่ต่ำลง ความดันสูญเสียค่อนข้างต่ำ โดยปกติน้อยกว่า 0.5 psi. สำหรับอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ความดันลดอาจเป็นหลาย psi ณ การไหลเต็มที่.

ความดันลดคร่อมลูกกลอยสำหรับการไหลที่เป็นของเหลวสามารถคำนวณด้วยสมการ,

$$h_f = \frac{0.078 W_f (P_f - P)}{D_f^5 P_f P}$$

สำหรับการไหลที่เป็นก๊าซใช้สมการ,

$$h_g = \frac{0.078 W_f}{D_f^3}$$

- โดยที่ h_f = ความดันลดคร่อมของลูกลอยเมื่อเป็นของเหลว (นิ้ว),
 h_g = ความดันลดคร่อมของลูกลอยเมื่อเป็นก๊าซ (นิ้ว),
 W_f = น้ำหนักของลูกลอย (กรัม),
 D_f = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลูกลอย (นิ้ว),
 ρ_f = ความหนาแน่นของลูกลอย (กรัม).

การคำนวณขนาดเครื่องมือวัด

ปกติเครื่องมือวัดชนิดวัดพื้นที่ ที่ใช้งานสำหรับจุดประสงค์ทั่วไป มักแสดงช่วงการไหลเป็นการไหลของน้ำหรืออากาศ ณ ความดัน 14.7 psia หรือ 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 70^oฟ. (21^oซ.). ดังนั้น การหาขนาดของเครื่องมือวัดสำหรับของไหลชนิดอื่นที่ไม่ใช่น้ำหรืออากาศที่ความดัน 14.7 psia หรือ 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 70^oฟ. (21^oซ.) จำเป็นต้องหาการไหลที่เทียบเท่ากับน้ำหรืออากาศ ดังสมการข้างล่างนี้.

สมการหน่วยมวลการไหล,

$$W_w = W_r \frac{\sqrt{\rho_w (\rho_{fr} - \rho_r)}}{\sqrt{\rho_r (\rho_{fr} - \rho_r)}}$$

- โดยที่ W_w = น้ำหนักของน้ำ หรืออากาศ (กิโลกรัม),
 W_r = น้ำหนักของของไหลที่ต้องการเทียบ (กิโลกรัม),
 ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ หรืออากาศ,
 ρ_r = ความหนาแน่นของไหลที่ต้องการเทียบ,
 ρ_{fw} = ความหนาแน่นของลูกลอย สำหรับ น้ำ หรืออากาศ,
 ρ_{fr} = ความหนาแน่นของลูกลอย สำหรับ ของไหลที่ต้องการเทียบ.

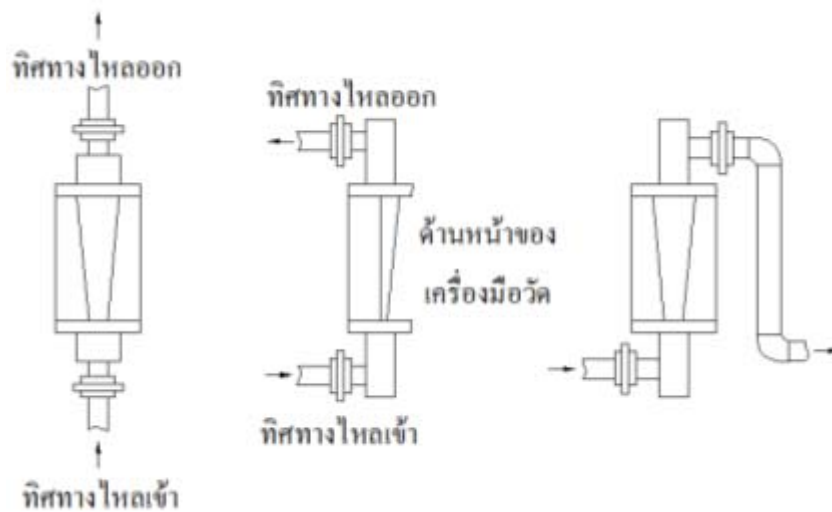
สมการหน่วยปริมาตรการไหล,

$$Q_w = Q_r \frac{\sqrt{\rho_w (\rho_{fw} - \rho_w)}}{\sqrt{\rho_r (\rho_{fr} - \rho_r)}}$$

- โดยที่ Q_w = ปริมาตรของน้ำ หรืออากาศ (กิโลกรัม),
 Q_r = ปริมาตรของของไหลที่ต้องการเทียบ (กิโลกรัม),
 ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ หรืออากาศ,
 ρ_r = ความหนาแน่นของไหลที่ต้องการเทียบ,
 ρ_{fw} = ความหนาแน่นของลูกลอย สำหรับ น้ำ หรืออากาศ,
 ρ_{fr} = ความหนาแน่นของลูกลอย สำหรับ ของไหลที่ต้องการเทียบ.

การติดตั้ง

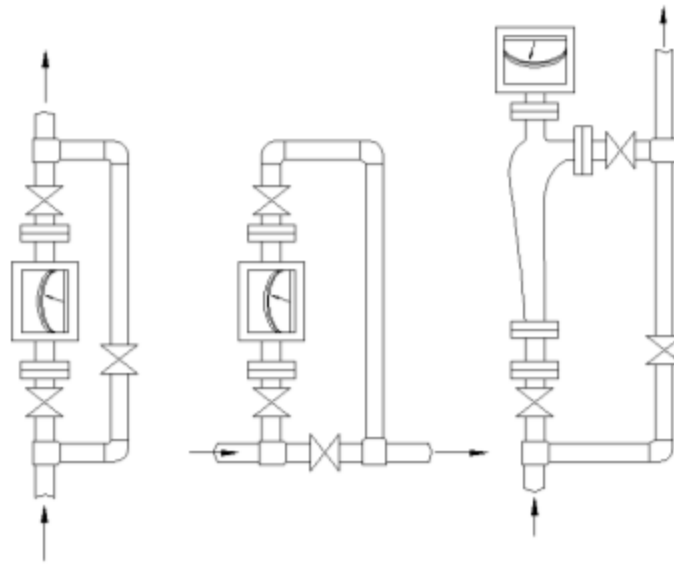
โดยทั่วไปเครื่องมือวัดแบบวัดพื้นที่มีข้อจำกัดการติดตั้งน้อยกว่าเครื่องมือวัดแบบอื่นๆ ยกเว้นแบบใช้แรงสปริง เครื่องวัดแบบนี้ต้องติดตั้งในแนวนอน ดังรูปที่ 45.



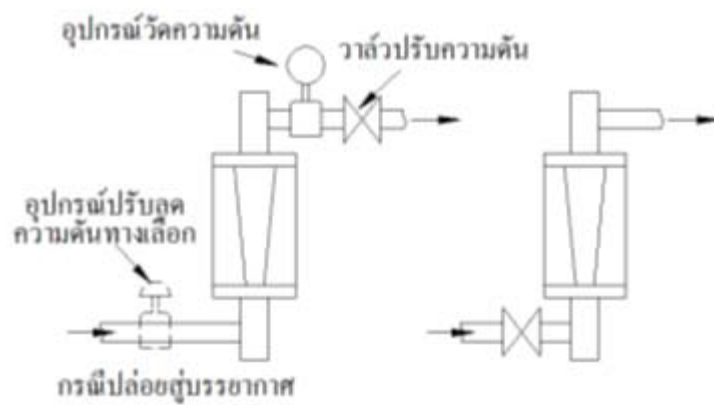
รูปที่ 45. การจัดวางระบบท่อสำหรับเครื่องมือวัดแบบพื้นที่โดยทั่วไป.

แนวทางการติดตั้ง

1. เครื่องวัดแบบนี้ส่วนใหญ่สามารถหมุนรับโดยระบบท่อได้ ถึงแม้ว่าจะเป็นชนิดท่อโลหะและชนิดลูกสูบที่มีน้ำหนักค่อนข้างมาก แต่ควรมีการยึดหรือหมุนรับโดยตรง หรือใกล้ๆ กับข้อต่อท่อ.
2. เครื่องมือวัดการไหลในเส้นทางวิกฤตในกระบวนการผลิตที่ต่อเนื่อง ควรมีการติดตั้งวาล์วบายพาส ดังรูปที่ 46.
3. หลีกเลี่ยงการใช้วาล์วชนิดเปิดเร็ว เช่น บอลวาล์ว, โซลินอยด์วาล์ว ฯลฯ ในการเป็นวาล์วเริ่มต้นการใช้งานในระบบอากาศอัด เนื่องจากอาจเป็นสาเหตุให้ลูกลอยเสียหายจากการกระแทกกับตัวกั้นลูกลอยด้านบน.
4. ติดตั้งอุปกรณ์นิรภัยไว้ด้วยเสมอ เพื่อให้มั่นใจว่าความดันเส้นท่อไม่เกินอัตราความดันของเครื่องมือวัด.
5. มาตรฐานความดันที่ใช้สำหรับการควบคุมความดันของก๊าซในการควบคุมการปรับแก้ ควรนำมาติดตั้งให้ใกล้กับทางออกของเครื่องมือวัดเท่าที่เป็นไปได้ โดยไม่มีวาล์วหรือการกีดขวางใดๆ ระหว่างเครื่องมือวัดกับมาตรวัดความดัน ดังรูปที่ 47.
6. การใช้งานเครื่องมือวัดกับก๊าซ ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับลดความดัน (throttling device) อย่างเช่น วาล์ว, อุปกรณ์ควบคุมความดันย้อนกลับ หรืออุปกรณ์ควบคุมความดัน ทั้งนี้ควรติดตั้งให้ใกล้กับทางออกของเครื่องมือวัดดังรูปที่ 47.
7. เครื่องมือวัดชนิดลูกสูบควรมีการติดตั้งตัวกรอง (strainer) ทางด้านทางเข้าของเครื่องมือวัด.
8. เครื่องมือวัดชนิดไหลผ่านตรงที่มีคัปปลิงแม่เหล็กในการอ่านค่า ควรติดตั้งอุปกรณ์ที่มีการตัดสารแม่เหล็กด้านทางเข้าของเครื่องมือวัด ถ้าหากมีเศษเหล็กหรือเหล็กกล้าในระบบท่อ.
9. ถ้าลูกลอยจำเป็นต้องมีสอติใส่ในเวลาที่มีการติดตั้ง ต้องแน่ใจว่าได้ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตอย่างถูกต้อง.



รูปที่ 46. การติดตั้งระบบท่อขายพาสสำหรับเครื่องมือวัดแบบพื้นที่.



รูปที่ 47. การจัดวางระบบท่อสำหรับเครื่องมือวัดแบบพื้นที่ที่ใช้งานกับก๊าซโดยทั่วไป.

แนวทางการบำรุงรักษา

แนวทางการบำรุงรักษาเครื่องมือวัดแบบวัดพื้นที่โดยทั่วไป ได้แก่ :

1. ต้องทำความสะอาดหลอดแก้วอยู่เสมอ โดยขณะที่ถอดหลอดแก้วออกทำความสะอาดเมื่อประกอบเข้ากับระบบท่อต้องตรวจสอบซีลกันรั่ว และเปลี่ยนออกหากเกิดการฉีกขาด ถูกกัดกร่อน บวม หรือขาดความยืดหยุ่นที่ควรเป็น.
2. ควรตรวจสอบหลอดแก้วด้วยสายตาอย่างสม่ำเสมอ หากพบการสึกหรือการแตก การร้าว หรืออื่นๆ ต้องเปลี่ยนออกทันที เพราะจะทำให้การอ่านค่าผิดพลาด.
3. ถ้ามีตะกอนอยู่ตามแผ่นแยก ต้องมั่นใจว่าไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาดต่อการวัด.
4. ทรานสมิตเตอร์ที่คู่ควบทางแม่เหล็ก ควรได้รับการตรวจสอบตำแหน่งของตัวชี้วัด (Pointer) เทียบกับสัญญาณออกอย่างสม่ำเสมอ ในการใช้งานส่วนใหญ่สามารถถอดที่ครอบเครื่องมือวัดออก และเลื่อนตัวชี้วัดด้วยมือไปตามตำแหน่งต่างๆขณะที่ตรวจสอบค่าสัญญาณออกไปด้วย.

1.6.5 เครื่องสูบลม (Pump) (พินุกเกยตร 2546)

เครื่องสูบลมเป็นอุปกรณ์จำเป็นสำหรับการวิจัยนี้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงวิธีการคำนวณเครื่องสูบลม เพื่อส่งน้ำหรือของเหลวอื่นๆ ไปตามระบบท่อ, เพื่อจะได้เลือกขนาดและชนิดของเครื่องสูบลมที่เหมาะสม, รวมถึงการซ่อมบำรุงรักษาและการใช้งาน.

การจำแนกชนิดของเครื่องสูบลม

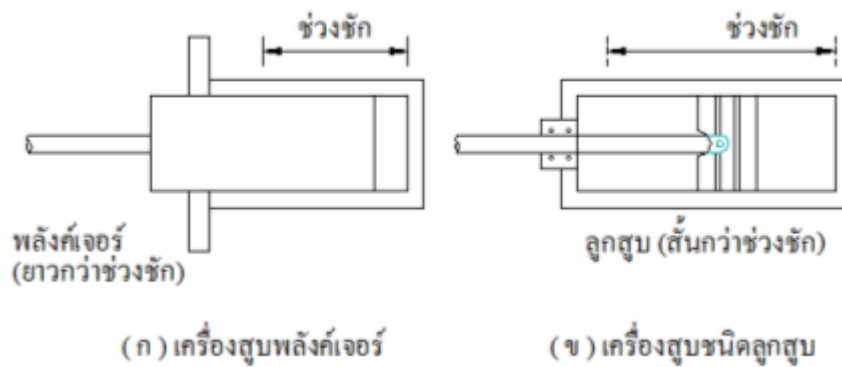
สามารถแบ่งตามหลักการส่งพลังงานไปสู่ของเหลว ได้ดังนี้ :

Displacement pump

เครื่องสูบลมชนิดนี้จะส่งพลังงานไปสู่ของเหลวเป็นจังหวะ โดยอาศัยแรงอัดลูกสูบหรือใบพัด จะทำให้ความดันของของเหลวสูงขึ้นโดยตรง.

Displacement pump จำแนกออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ :

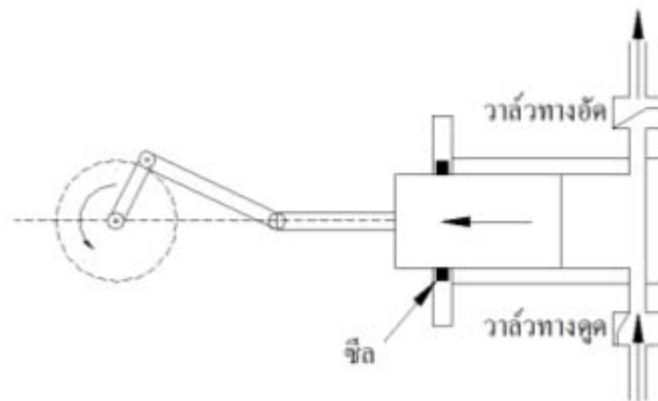
1. เครื่องสูบลมแบบลูกสูบ (reciprocating pump) จำแนกออกเป็น
 - 1.1 เครื่องสูบลมชนิดลูกสูบ (piston pump) และเครื่องสูบลมชนิด plunger pump. เครื่องสูบลมชนิดนี้อาศัยเครื่องยนต์ชนิดลูกสูบขับเคลื่อน ซึ่งต่ออยู่กับเพลาค้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์นั้น ซึ่งได้รับกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์โดยตรง. ปกติเครื่องสูบลมทำงานด้วยอัตราเร็วรอบคงที่ แต่จากผลความเฉื่อย (inertia effect) ของชิ้นส่วนต่างๆ ทำให้อัตราเร็วรอบของเครื่องสูบลมถูกจำกัดสูงสุดไม่เกิน 8,000 รอบต่อนาที. เครื่องสูบลมชนิดนี้จะมีทั้งสูบในแนวนอนและแนวตั้ง.



รูปที่ 48. เครื่องสูบลักษณะ plunger และชนิดลูกสูบ.

การทำงานจะอาศัยการเคลื่อนไหวกวของชิ้นส่วนสามชิ้น ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้ :

- ตัวลูกสูบหรือ plunger หมายถึง ชิ้นส่วนเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในกระบอกสูบดังรูปที่ 48 ถ้าเป็น plunger จะมีขนาดความยาวซึ่งยาวกว่าระยะช่วงชัก (stroke) และลูกสูบจะมีขนาดสั้นกว่าระยะช่วงชัก.
- วาล์วทางดูด (inlet valve) หมายถึง ช่องทางเข้าของของเหลวสู่ภายในกระบอกสูบ ดังรูปที่ 49.
- วาล์วทางอัด (discharge valve) หมายถึง ช่องทางออกของของเหลว ดังรูปที่ 49.



รูปที่ 49. เครื่องสูบลักษณะอัดด้านเดียว (single acting pump).

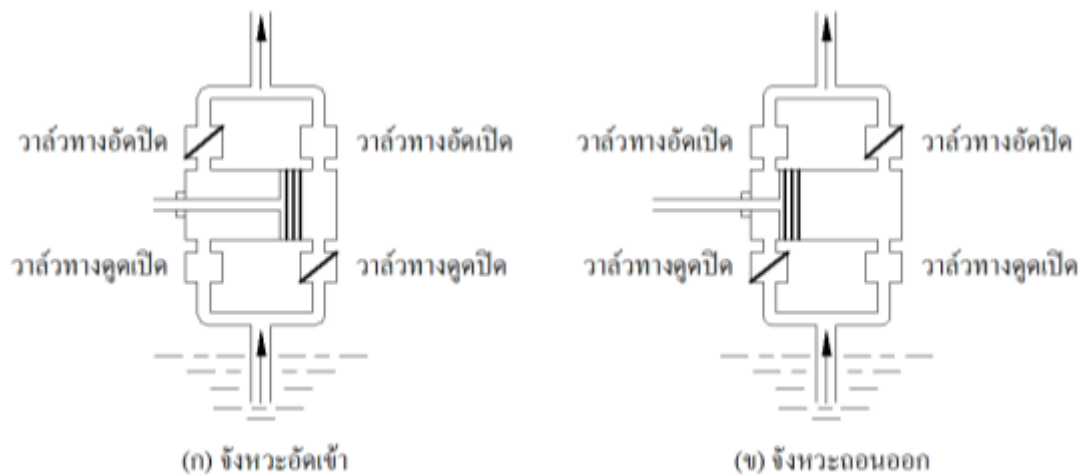
สำหรับการอัดของเหลวออกจากกระบอกสูบ สามารถจำแนกเครื่องสูบลักษณะเป็นเครื่องสูบลักษณะอัดด้านเดียว (single acting pump) ดังรูปที่ 49. โดยหนึ่งรอบการทำงานของเครื่องสูบลักษณะนี้ประกอบด้วยสองจังหวะ ได้แก่ :

- จังหวะดูด plunger จะเคลื่อนที่ออกจากกระบอกสูบ ทำให้เกิดสุญญากาศภายในกระบอกสูบ เป็นผลทำให้ของเหลวภายนอกถูกดูดเข้าภายในกระบอกสูบ. จะพบว่า ในจังหวะดูดนี้ วาล์วทางดูดจะเปิดและวาล์วทางอัดจะปิด.

- จังหวะอัด plunger จะเคลื่อนที่เข้ากระบอกสูบ ทำให้เกิดแรงอัดของเหลวที่อยู่ภายในกระบอกสูบ และของเหลวจะมีความดันสูงขึ้น ซึ่งขณะนั้นวาล์วทางดูดและทางอัดจะปิด. ถ้าความดันของของเหลวภายในกระบอกสูบสูงขึ้น จนสามารถดันวาล์วทางอัดให้เปิดออก และทำให้ของเหลวไหลออกจากกระบอกสูบด้วยความดันสูง.

สรุปได้ว่า เครื่องสูบแบบอัดด้านเดียวนั้นของเหลวจะถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้นในจังหวะอัด (ช่วงจังหวะที่ plunger เคลื่อนที่เข้ากระบอกสูบเท่านั้น).

เครื่องสูบน้ำสองด้าน (double acting pump) เครื่องสูบน้ำชนิดนี้สามารถอัดของเหลวได้ทุกจังหวะ ดังรูปที่ 50. เป็นเครื่องสูบน้ำสองจังหวะ ได้แก่ จังหวะอัดเข้า (inward stroke) และจังหวะถอยออก (outward stroke). ในจังหวะอัดเข้าของลูกสูบ วาล์วทางอัดด้านขวาเปิด ของเหลวจะถูกอัดออกจากเครื่องสูบน้ำบน, ส่วนด้านล่างวาล์วทางดูดด้านซ้ายเปิด และดึงของเหลวเข้ากระบอกสูบ. ในจังหวะถอยออกของลูกสูบ จะอัดของเหลวผ่านวาล์วทางอัดด้านซ้ายต่อไป ดังรูปที่ 50 (ก) และ (ข), ตามลำดับ.



รูปที่ 50. เครื่องสูบน้ำสองด้านเดียว (double acting pump).

การใช้งาน

ข้อดี

- เครื่องสูบบแบบลูกสูบชักมีประสิทธิภาพสูง.
- มีระบบไล่อากาศในตัวเอง.
- เหมาะสำหรับการใช้งานอัดของเหลวที่ต้องการแรงอัดสูง.

ข้อเสีย

- เนื่องจากเครื่องสูบชนิดนี้ทำงานที่รอบจำกัด ดังนั้นจึงไม่สามารถส่งของเหลวในอัตราการไหลสูงๆ ได้.
- ปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือนของตัวเครื่องสูบอันเป็นผลมาจาก pulsating nature ของการไหลของของเหลวผ่านเครื่องสูบสำหรับกรณีของเครื่องสูบอัดสองด้านสามารถลด pulsating nature ได้ ปกติจะลด pulsating nature ลงได้ต้องออกแบบให้ใช้เครื่องสูบชนิดหลายสูบ (multi-cylinder pump).
- ต้องหมั่นตรวจตราและบำรุงรักษาปลอกซีลอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากเครื่องสูบชนิดนี้ใช้งานที่ความดันสูง.

การคำนวณขีดความสามารถในการอัดของเหลว การคำนวณปริมาตรกระจัดของเครื่องสูบ (\dot{V}) จะพิจารณา ดังนี้ :

- สำหรับเครื่องสูบอัดด้านเดียว,

$$\dot{V} = ANLn$$

- สำหรับเครื่องสูบอัดสองด้าน,

$$\dot{V} = (2A-a) NLn,$$

$$\dot{V} = \text{ปริมาณกระจัดของเครื่องสูบ (m}^3/\text{s),}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (m}^2\text{),}$$

$$N = \text{รอบทำงานของเครื่องสูบ (rpm.),}$$

$$L = \text{ระยะช่วงชัก (m),}$$

$$n = \text{จำนวนกระบอกสูบ,}$$

$$a = \text{พื้นที่หน้าตัดของก้านสูบ (Piston rod : m}^2\text{).}$$

ขีดความสามารถในการอัดส่งของเหลวของเครื่องสูบลูกสูบมีค่าต่ำกว่าปริมาณกระจัดเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากขณะเครื่องสูบลูกสูบทำงานจะมีการรั่วผ่านซีลหรือปลอกซีล,

กำลังทางชลศาสตร์ (Hydraulic power) ที่ให้กับของเหลวหนึ่งๆ คำนวณจาก,

$$P_{hyd} = \rho g \dot{V} H,$$

$$P_{hyd} = \text{กำลังทางชลศาสตร์ (Watt)},$$

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของของเหลว (kg / m}^3\text{)},$$

$$g = \text{ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงมีค่าเท่ากับ 9.81 m/s}^2\text{,}$$

$$\dot{V} = \text{ปริมาณกระจัดของเครื่องสูบลูกสูบ (m}^3\text{ / s)},$$

$$H = \text{เสดทั้งหมดของเครื่องสูบลูกสูบ (m)}.$$

หากใช้มอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ขับเคลื่อนเครื่องสูบลูกสูบ กำลังเพลลา (Shaft power) จะคำนวณจาก,

$$P = \frac{P_{hyd}}{\eta_m}$$

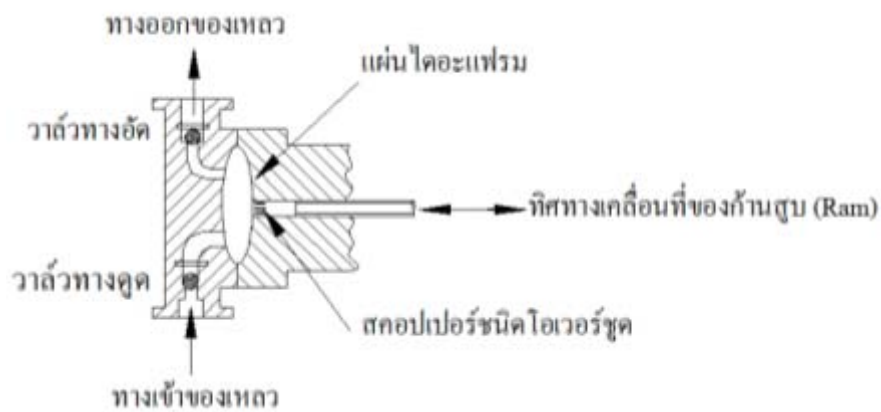
$$P = \text{กำลังเพลลา (Watt)},$$

$$\eta_m = \text{ประสิทธิภาพทางกล}.$$

ปกติประสิทธิภาพทางกลมีค่าประมาณร้อยละ 90-95, ถ้าหากใช้ gear box ในการลดอัตราเร็วรอบ ประสิทธิภาพทางกลจะมีค่าลดลงถึงร้อยละ 85 โดยประมาณ.

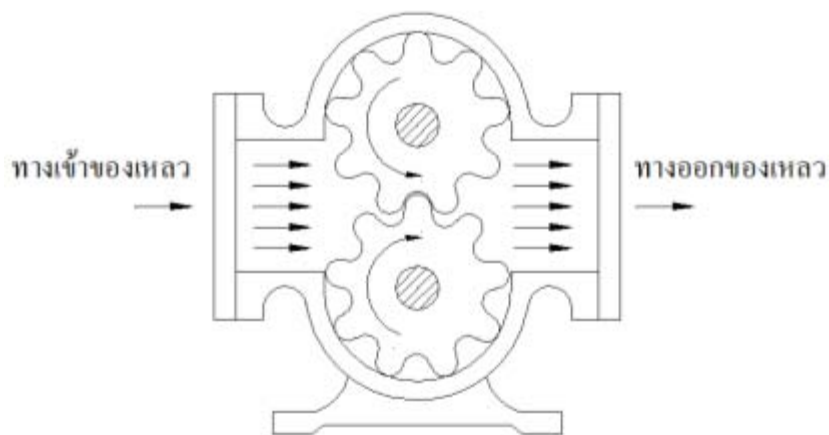
การใช้งาน เครื่องสูบลูกสูบ plunger ชนิดปรับระยะช่วงชักนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายตามอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถส่งของเหลวตามปริมาณที่ต้องการได้, อัตราการไหลช่วงตั้งแต่ 0.001 ถึง 2 ลิตรต่อวินาที และความดันสูงสุดที่ทำได้สูงถึง 100 bars. ทั้งนี้รวมถึงสามารถใช้งานในการสูบของเหลว เช่น กรดหรือสารละลายทางเคมี ด้วย.

เครื่องสูบลูกสูบชนิดไดอะแฟรม (diaphragm) มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเครื่องสูบลูกสูบชนิดลูกสูบหรือเครื่องสูบลูกสูบ plunger ดังรูปที่ 51. ต่างกันตรงที่ อาศัยการเคลื่อนไหวนៃของไดอะแฟรม แทนลูกสูบ. การเคลื่อนไหวนៃของแผ่นไดอะแฟรมจะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนไหวนៃของลูกสูบหรือ plunger.

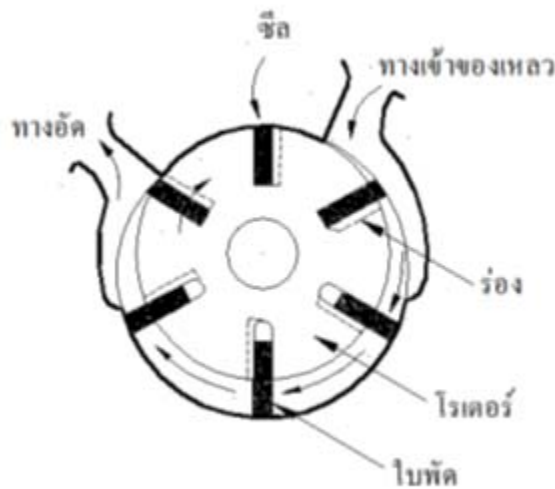


รูปที่ 51. เครื่องสูบน้ำชนิดไดอะแฟรม (diaphragm).

เครื่องสูบน้ำแบบโรตารี (rotary pump) จะอาศัยหลักการหมุนเหวี่ยงของเหลวภายใต้ปริมาตรคงที่และสามารถอัดส่งของเหลวจากทางดูดออกสู่ทางอัดได้เลย โดยไม่ต้องสูบน้ำแบบโรตารีชนิดเฟือง, ดังรูปที่ 52 และเครื่องสูบน้ำแบบโรตารีชนิดใบพัด ดังรูปที่ 53. เครื่องสูบน้ำแบบโรตารีเหมาะใช้งานกับของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น น้ำมันเครื่อง, จาระบี และของเหลวที่มีสารแขวนลอยปนอยู่.



รูปที่ 52. เครื่องสูบน้ำชนิดเฟือง (gear pump) ขับภายนอก.



รูปที่ 53. เครื่องสูบน้ำชนิดใบพัด (vane pump).

ด้านความปลอดภัย

สำหรับเครื่องสูบน้ำประเภท displacement pump ทั้งหลายควรติดตั้งวาล์วระบายความดัน (relief valve) ที่ห้องสูบน้ำเพื่อป้องกันอันตรายจากบางสาเหตุที่ทำให้ความดันภายในห้องสูบน้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก.

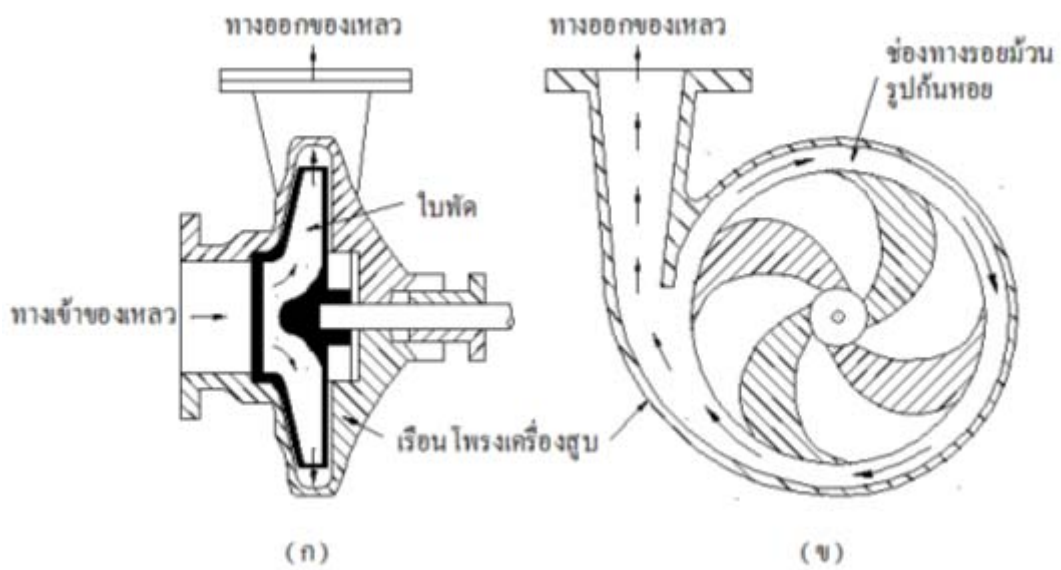
Dynamic pump

เครื่องสูบน้ำชนิดนี้จะส่งพลังงานไปสู่ของเหลวอย่างต่อเนื่องทำให้ของเหลวมีความเร็วสูงขึ้น จากนั้นความเร็วของของเหลวจะถูกลดลงทันที จึงทำให้ความดันของของเหลวในเครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้น.

Dynamic pump จำแนกออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ ได้แก่ :

- 1) เครื่องสูบน้ำชนิดพิเศษ (special pump) จำแนกออกเป็น
 - 1.1 เครื่องสูบน้ำแบบเจ็ต (jet pump).
 - 1.2 เครื่องสูบน้ำชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic pump).
- 2) เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (centrifugal pump) จำแนกออกเป็น
 - 2.1 เครื่องสูบน้ำชนิดไหลแนวแกน (axial flow pump).
 - 2.2 เครื่องสูบน้ำชนิดแนวรัศมี (radial flow pump).
 - 2.3 เครื่องสูบน้ำชนิดไหลผสม (mixed flow pump).

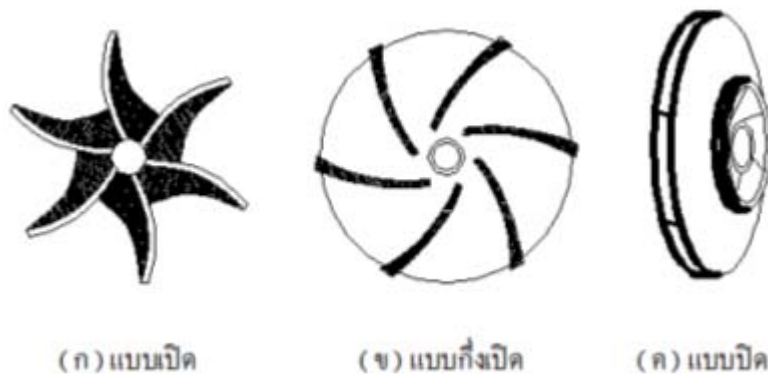
เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งอาศัยผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำให้ของเหลวมีความดันเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งประกอบด้วยสองชิ้นส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนขับหมุน (ใบพัด) และเรือนโพรงของเครื่องสูบน้ำ ดังรูปที่ 54 (ก) และ (ข).



รูปที่ 54. เครื่องสูบแบบหอยโข่ง (centrifugal pump).

หลักการทำงาน ขณะของเหลวบรรจุเต็มเรือน โพรงเครื่องสูบเมื่อใบพัดหมุนที่อัตราเร็วรอบหนึ่ง จะเกิดสุญญากาศในบริเวณศูนย์กลางใบพัด. ผลของสุญญากาศจะดึงเอาของเหลวที่ไหลตามมาจากทางเข้าเครื่องสูบและไหลเข้าทางศูนย์กลางใบพัด และถูกเหวี่ยงออกจากใบพัดด้วยความเร็วสูงมาก. ถ้าของของเหลวที่ไหลออกด้วยความเร็วสูง จะไหลผ่านช่องทางรอยม้วนรูปก้นหอยในเรือน โพรงเครื่องสูบ. เนื่องจาก พื้นที่หน้าตัดของช่องทางจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจึงทำให้พลังงานจลน์ของของเหลวเปลี่ยนเป็นพลังงานเนื่องจากความดัน (Pressure energy) ทำให้ของเหลวมีความดันสูงขณะไหลออกจากเครื่องสูบ.

ใบพัดในเครื่องสูบแบบหอยโข่ง ประสิทธิภาพของเครื่องสูบแบบหอยโข่ง ขึ้นอยู่กับแบบของใบพัดที่ใช้ โดยใบพัดทั้งสามแบบ ดังรูปที่ 55, ได้แก่ :

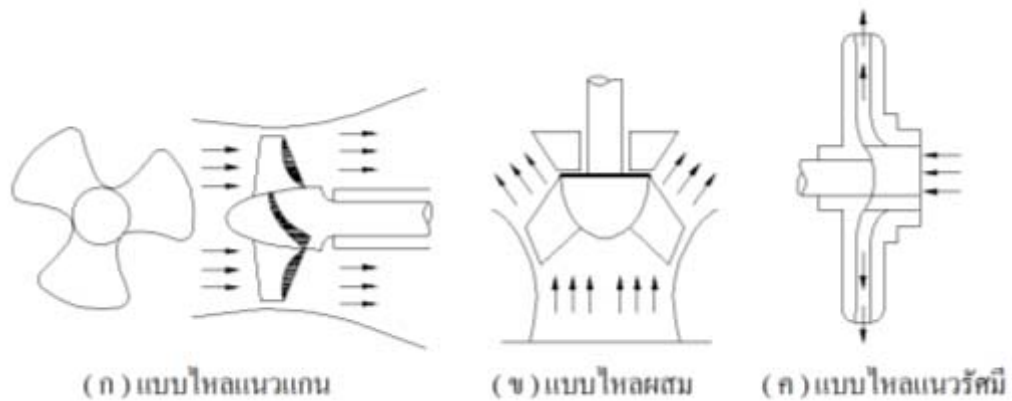


รูปที่ 55. ใบพัดที่ใช้ในเครื่องสูบแบบหอยโข่ง (centrifugal pump).

- 1) ไบพัดแบบเปิด (open type) เหมาะสำหรับใช้ส่งของเหลวที่มีหัวน้ำต่ำ ประสิทธิภาพต่ำ และใช้กันน้อย.
- 2) ไบพัดแบบกึ่งเปิด (semi-open type) เหมาะสำหรับใช้กับของเหลวที่มีสารแขวนลอย ปกตินิยมใช้ในการระบายน้ำหรือน้ำไฮโดรค ซึ่งอาจจะมีทรายปนมาด้วย.
- 3) ไบพัดแบบปิด (enclosed type) มีประสิทธิภาพสูงกว่าสองแบบแรก นิยมใช้กันมากกว่า แต่ราคาแพง.

รูปร่างของไบพัดขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและหัวน้ำการสูบทั้งหมดที่ต้องการ มีด้วยกันสามลักษณะ ดังรูปที่ 56, ซึ่งได้แก่ แบบไหลผ่านแนวแกน (axial flow) แบบไหลผสม (mixed flow) และแบบไหลผ่านรัศมี (radial flow), ซึ่งข้อแตกต่างในการใช้งานในแต่ละแบบนี้ :

- 1) แบบไหลผ่านแนวแกน หรือเรียกว่า propeller type เหมาะสำหรับใช้ส่งของเหลวปริมาณมากภายใต้หัวน้ำที่มีค่าต่ำ เช่น การส่งน้ำเพื่อการชลประทานหรือการระบายน้ำเป็นต้น เครื่องสูบขณะทำงานจะติดตั้งจมในน้ำของเหลวนั้นตลอดเวลา.
- 2) แบบไหลผสม เหมาะสำหรับใช้ส่งของเหลวปริมาณมากภายใต้หัวน้ำต่ำเช่นกัน.
- 3) แบบไหลผ่านแนวรัศมี เป็นเครื่องสูบที่ให้เฮดความดันสูง และส่งของเหลวผ่านไปด้วยอัตราการไหลต่ำ.



รูปที่ 56. รูปร่างลักษณะของไบพัด.

เครื่องสูบแบบหอยโข่งจำแนกแบบตามพื้นฐานของการออกแบบโครงสร้างภายใน เช่น ในรูปของช่องทางรอยม้วนรูปก้นหอย (volute) หรือ regenerative เป็นต้น ซึ่งสามารถจำแนกออกได้แก่ :

- แกนเพลลาขับหมุนเครื่องสูบน้ำจัดในแนวนอนหรือแนวตั้ง,
- ทิศทางของทางดูดหรือทางอัดของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งจะกำหนดอยู่ด้านข้าง ด้านบน หรือด้านล่างของเครื่องสูบน้ำ,
- จำนวนตอน (stages) ของการสูบน้ำซึ่งจะกำหนดเป็นตอนเดียว หรือหลายตอน,
- ตำแหน่งติดตั้งของเครื่องสูบน้ำ จะติดตั้งเครื่องสูบน้ำแบบอินไลน์ (in-line pumps) หรือเครื่องสูบน้ำติดตั้งจมในของเหลว,
- เครื่องสูบน้ำบริการ (Pump service) ซึ่งจะกำหนดใช้กับของเหลวที่เป็นน้ำ ของเหลว เป็นต้น.

ข้อดีและข้อเสียของเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง

ข้อดี

- มีขนาดกะทัดรัดและถูกกว่าเครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบ หรือ หรือเครื่องสูบน้ำแบบโรตารี.
- สามารถต่อคัปปลิง เข้ากับมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ได้โดยตรง.
- สามารถส่งได้ทั้งของเหลว และของเหลวที่มีสารแขวนลอย.
- มีการสั่นสะเทือนของตัวเครื่องสูบน้ำน้อยเนื่องจากไม่มี pulsating effect.

ข้อเสีย

- ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำอยู่ในเกณฑ์ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบชัก.
- จะต้องไล่อากาศออกจากเครื่องสูบน้ำก่อนเดินเครื่อง.

ลักษณะของเครื่องสูบน้ำ (pump characteristics) สำหรับเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งระบุด้วยตัวแปร ดังนี้ :

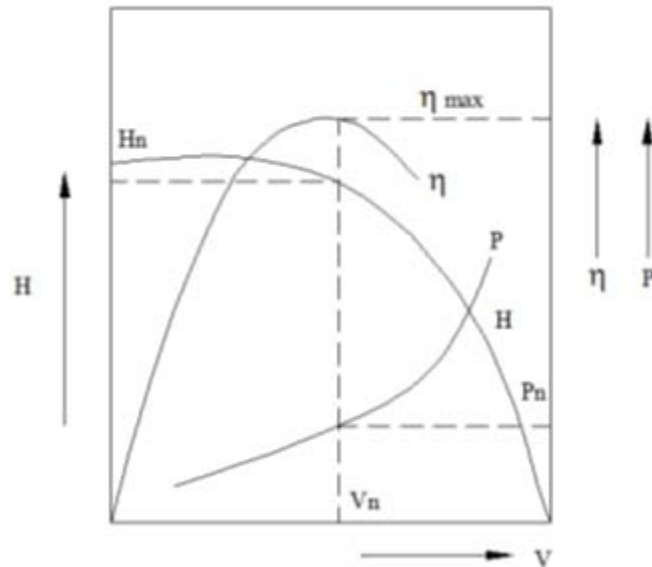
ขีดความสามารถในการสูบน้ำ (Q) หมายถึง ปริมาณของเหลวที่เครื่องสูบน้ำสามารถส่งได้ต่อหนึ่งเวลา มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที (l/s) หรือ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/s).

เฮดของเครื่องสูบน้ำ (H) หมายถึงงานสุทธิที่ให้กับของเหลวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักขณะไหลจากทางเข้าไปสู่ทางออกของเครื่องสูบน้ำ มีหน่วยเป็น เมตรของของเหลวนี้.

กำลังของเครื่องสูบน้ำ (P) หมายถึงอัตราการให้พลังงานกับของเหลว ซึ่งวัดที่ pump output มีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt) หรือ กิโลวัตต์ (Kw).

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ (η) หมายถึง อัตราส่วนของกำลังทางกลศาสตร์ต่อกำลังงานป้อนเข้าเพลลาของเครื่องสูบน้ำ สำหรับกำลังงานป้อนเข้าเพลลานี้เรียกว่า กำลังเบรก (brake power) หรือ กำลังเพลลา (shaft power).

เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของเครื่องสูบน้ำการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่อัตราเร็วรอบหนึ่งแสดงผลดังรูปที่ 57 นั่นคือ จะพล็อตเฮด, กำลัง และประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำเป็นฟังก์ชันกับอัตราการไหล (ความสามารถในการสูบน้ำ). จุดทำงานที่เหมาะสมของเครื่องสูบน้ำ คือ จุดที่เครื่องสูบน้ำให้ประสิทธิภาพสูงสุด. เฮด, กำลัง และอัตราการไหลที่จุดนี้เป็นค่าปกติใช้งาน ซึ่งแสดงด้วย H_n , P_n และ V_n ดังรูปที่ 57.



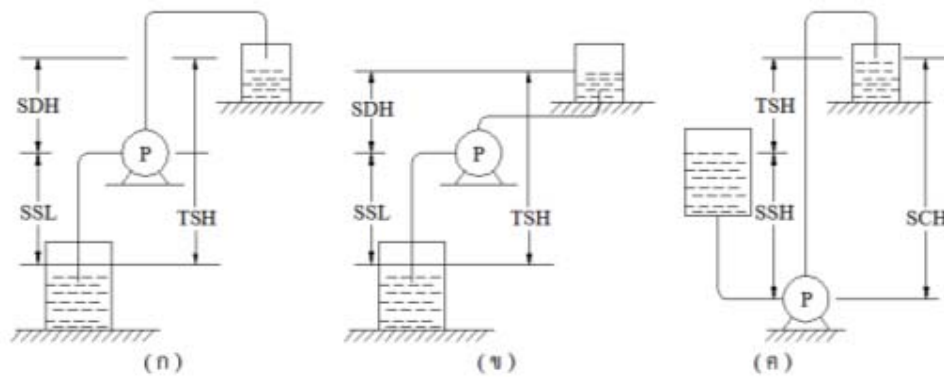
รูปที่ 57. เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง.

การคำนวณหาขนาดเครื่องสูบน้ำ

ในการคำนวณหาขนาดเครื่องสูบน้ำ มีสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคงนี้ ระบบการใช้เครื่องสูบน้ำ, เส้นโค้งของเฮด, ในระบบท่อ, ระยะยกด้านดูด, โดยมีรายละเอียดดังนี้ :

ระบบการใช้เครื่องสูบน้ำ

ระบบการใช้เครื่องสูบน้ำ ประกอบด้วย เครื่องสูบน้ำ, ท่อ, วาล์ว, ข้อต่อ และถังเก็บ, เป็นต้น. การเลือกขนาดเครื่องสูบน้ำให้ใช้งานในระบบได้ จะต้องคำนึงถึงผลของความต้านทานการไหลผ่านท่อ, ข้อต่อ หรือวาล์วในระบบ. นอกจากนี้ จะต้องคิดรวมถึงเฮดในการยกของเหลวจากระดับทางดูด (suction level) ไปสู่ระดับทางอัด (discharge level) ด้วย ดังแสดงส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 58.



รูปที่ 58. ส่วนต่างๆ และนิยามในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (system static head).

Static suction lift (SSL) หมายถึงระยะความสูงวัดในแนวตั้งหน่วยเป็นเมตร. วัดจากระดับของเหลวตรงด้านดูดถึงจุดศูนย์กลางของเครื่องสูบ. ในกรณีนี้เครื่องสูบอยู่เหนือระดับของเหลว นั่น, ดังรูปที่ 58 (ก) และ (ข).

Static suction head (SSH) หมายถึงระยะความสูงวัดระหว่างระดับผิวของเหลวด้านดูดถึงศูนย์กลางเครื่องสูบ. ในกรณีนี้เครื่องสูบอยู่ต่ำกว่าระดับของเหลว นั่น, ดังรูปที่ 58 (ค).

Static discharge head (SDH) หมายถึงระยะความสูงวัดระหว่างศูนย์กลางของเครื่องสูบจนถึงผิวของเหลวด้านอัดหรือปลายท่อปล่อย, วัดในหน่วยเมตรของเหลว นั่น.

Total static head (TSH) หมายถึงระยะความสูงวัดระหว่างระดับผิวของเหลวด้านดูดกับปลายท่อปล่อย หรือระดับผิวของเหลวด้านเสด, ซึ่งสัดส่วนนี้จะรวมความดัน (pressure head) ด้วย ถ้ามี.

Pressure head เสดความดัน หมายถึง ความดันที่จุดใดจุดหนึ่งซึ่งเขียนเทียบเท่าความสูงของลำของเหลว นั่น เขียนในเทอมของ $P/\rho g$.

Velocity head เสดพลังงานจลน์ หมายถึง พลังงานจลน์ของของเหลวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของเหลว นั่น มีหน่วยเป็นเมตรของของเหลว เขียนในเทอมของ $C^2/2g$ (โดยที่ C คือความเร็วของของเหลว).

System resistance head (SRH) เสดเทียบเท่าของของเหลวที่จะต้องเอาชนะความต้านทานการไหลของท่อ, วาล์ว และข้อต่อต่างๆ เป็นต้น ซึ่งจะรวมทั้งเสด, พลังงานจลน์, การสูญเสียตรงทางเข้าและทางอัดของเครื่องสูบด้วย.

System total head หมายถึงผลรวมของ System resistance head และ TSH.

เสถียรภาพในระบบ

เสถียรภาพในแต่ละอุปกรณ์ระบบท่อ แบ่งออกเป็น :

1) ความเสถียรทานในท่อส่งของเหลว โดยเสถียรทานในท่อตรงสามารถคำนวณได้จาก Darcy formula ดังนี้ :

$$h_f = f \left(\frac{L}{d} \right) \left(\frac{C^2}{2g} \right)$$

- โดยที่ f = ตัวประกอบความเสถียรทาน,
 L = ความยาวท่อ (m),
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m),
 C = ความเร็วเฉลี่ยของของเหลว (m/s),
 g = ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

ถ้าทราบอัตราการไหล (\dot{V}) ของของเหลวผ่านท่อ, พบว่า

$$C = \frac{4 \dot{V}}{\pi d^2}$$

ดังนั้น

$$h_f = \frac{8 f L}{g \pi^2 d^5} V^2$$

$$h_f = k_f \dot{V}^2$$

k_f = สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลเนื่องจากความเสถียรทานในท่อ,

\dot{V} = อัตราการไหลของของเหลวผ่านท่อ.

2) ความเสถียรทานความดันผ่านชุดอุปกรณ์ในระบบท่อเนื่องจากในระบบท่อส่งของเหลว จะประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ต่างๆ เช่น วาล์ว, ข้อลด, ข้อเพิ่ม, ข้อเลี้ยว หรือข้อต่อต่างๆ. เมื่อของเหลวที่มีความดันไหลผ่านชุดอุปกรณ์ในระบบท่อ จะมีการเสถียรทานความดัน เพื่อเอาชนะความต้านทานในชุดอุปกรณ์นั้น. โดยทั่วไปจะกำหนดความต้านทานในชุดอุปกรณ์ในเทอมของความยาวเทียบเท่าตามตารางที่ 4.

ตารางที่ 4. ความยาวเทียบเท่าของชุดอุปกรณ์ในระบบท่อ

ชุดอุปกรณ์	อัตราส่วนของ L/D
โกลบวาล์ว (เปิดเต็มที่)	200
เกตวาล์ว (เปิดเต็มที่)	10
เกตวาล์ว (เปิด 1 ใน 4)	1,000
วาล์วกันกลับเปิดเต็มที่	150
วาล์วกันกลับ (มีตัวกรอง)	400
ข้อเสี้ยว 90° มาตรฐาน	30
ข้อเสี้ยว 90° รัศมียาว	20
ข้อแยก 3 ทาง (ไหลผ่านแนวท่อเดิม)	20
ข้อแยก 3 ทาง (ไหลผ่านท่อสาขา)	60

3) เสียดสูญเสียขณะของของเหลวไหลเข้าท่อทางดูด โดยเสียดสูญเสียส่วนนี้คำนวณจาก,

$$h_m = 0.5 \frac{C_s^2}{2g}$$

โดยที่ C_s = ความเร็วของของเหลวในท่อทางดูด (m/s).

เมื่อของเหลวไหลออกจากปลายท่ออิสระ หรือปลายท่อจมสามารถคำนวณเสียดสูญเสียรองจาก,

$$h_m = \frac{C_d^2}{2g}$$

โดยที่ C_d = ความเร็วของของเหลวในท่อทางออก (m/s).

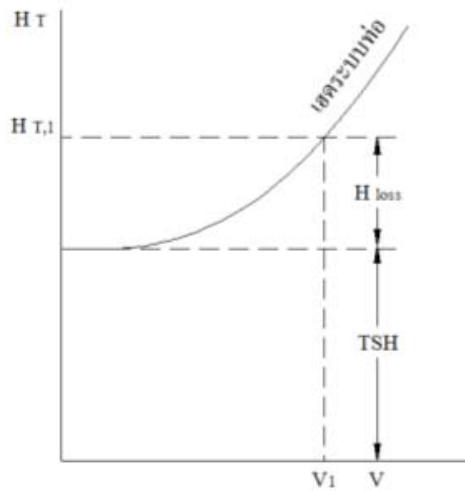
เส้นโค้งของเฮดในระบบท่อ

ภายในระบบท่อหนึ่งๆ กำหนดให้มีเสียดสถิตย์คงตัว, เสียดสูญเสียในระบบท่อจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอัตราการไหลยกกำลังสองของเฮดทั้งหมดของระบบ คือ ผลรวมของเสียดสถิตย์ทั้งหมดกับเสียดสูญเสียทั้งหมดของระบบท่อ.

$$\begin{aligned} H_T &= TSH + H_{loss} \\ &= TSH + K V^2 \end{aligned}$$

K = สัมประสิทธิ์ความต้านทานของระบบ.

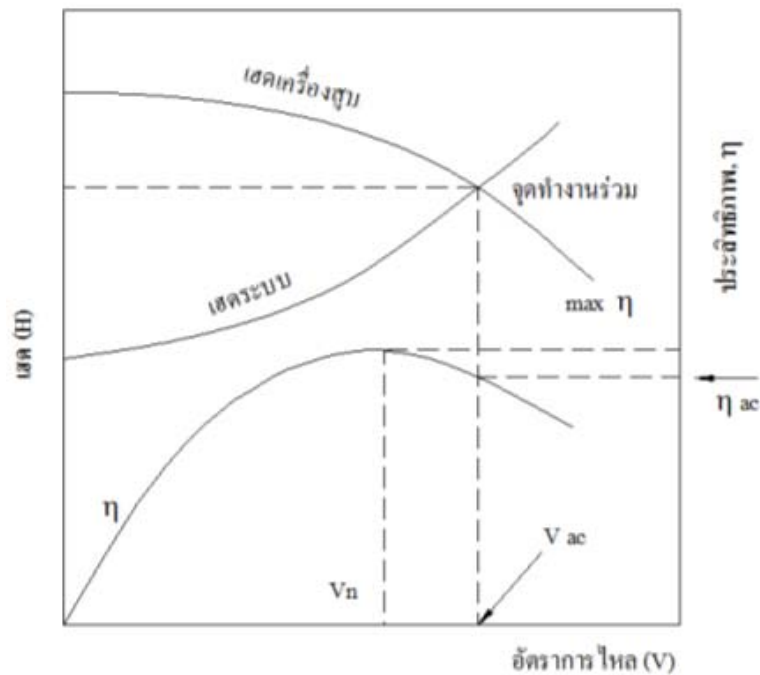
โดยปกติ จะพล็อตกราฟเฮดทั้งหมดในระบบท่อกับอัตราการไหลค่าต่างๆ ดังรูปที่ 59.



รูปที่ 59. เส้นโค้งเฮดทั้งหมดในระบบท่อ.

จุดทำงานร่วม

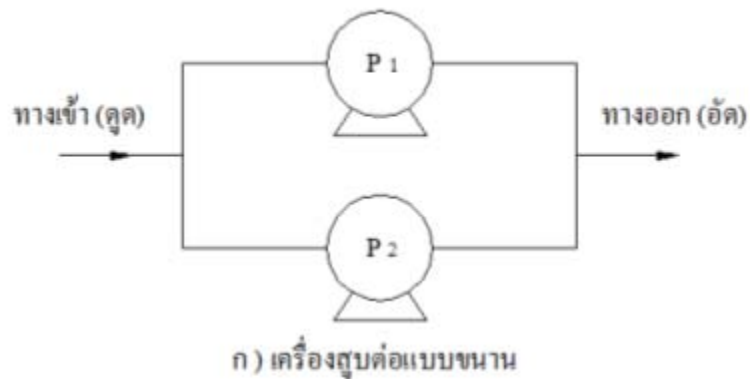
เมื่อเครื่องสูบบางชนิดทำงาน จะพบว่า อัตราการไหลที่ได้จะขึ้นอยู่กับเฮด ซึ่งผู้ผลิตจะสร้างกราฟลักษณะเฉพาะ head capacity ($H-V$) ของเครื่องสูบ. เมื่อนำมาพล็อตร่วมกับเส้นโค้งเฮดทั้งหมดในระบบท่อ จะได้ดังรูปที่ 60. จุดตัดระหว่างเส้นโค้งเฮดระบบกับเฮดเครื่องสูบ คือ จุดทำงานร่วม.



รูปที่ 60. จุดทำงานร่วมระหว่างเครื่องสูบบกับระบบท่อ.

การทำงานของเครื่องสูบล้อแบบอนุกรม และต่อแบบขนาน

เพื่อให้การใช้งานของเครื่องสูบล้ออยู่ในช่วงกว้างกว่าเดิม นิยมใช้เครื่องสูบล้อสองตัวหรือมากกว่า นำมาต่อแบบอนุกรม หรือแบบขนานดังรูปที่ 61. กรณีการใช้เครื่องสูบล้อต่อแบบขนานสองตัวหรือมากกว่า เป็นวิธีนิยมใช้ในกรณีที่เครื่องสูบล้อทำงานแบบ variable capacity. ภายใต้การใช้งานของเครื่องสูบล้อต่อแบบขนานนี้ ที่อัตราการไหลหนึ่ง สามารถทำงานที่จุดใช้งาน (ระหว่างเครื่องสูบล้อและระบบท่อ) ที่ใกล้เคียงกับจุด ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดได้. ในกราฟเส้นโค้ง $H-V$ สามารถพล็อตได้จากการเพิ่มปริมาณอัตราการสูบล้อ (capacity) ที่เสถียรเดียวกัน.



รูปที่ 61. เครื่องสูบล้อต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน.

เมื่อนำไปพล็อตกราฟรวมบนกราฟเส้นโค้ง $H-V$, เส้นโค้งของเครื่องสูบล้อต่อแบบขนานจะตัดกับเส้นโค้งเสถียรของระบบจะได้จุดใช้งานร่วม, ซึ่งที่จุดนี้ จะให้อัตราการไหลในระบบท่อที่เพิ่มขึ้น (จุดใช้งานร่วมจะต่างจุดกับจุดใช้งานร่วมในกรณีใช้เครื่องสูบล้อตัวเดียว). ข้อสังเกตในกรณีใช้เครื่องสูบล้อขนาดเดียวกันต่อขนาน, อัตราการไหลในระบบจะไม่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า. ทั้งนี้อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับเส้นโค้งเสถียรของระบบ.

ระยะยกด้านดูด

ระยะยกด้านดูดสูงสุดของเครื่องสูบน้ำในทางทฤษฎี คือ ความสูงของลำของเหลวภายใต้ความดันบรรยากาศ, เช่น ถ้าความดันบรรยากาศ $P_{atm} = 1.013 \text{ bar}$, ระยะยกสูงสุดสำหรับน้ำคำนวณจาก,

$$\begin{aligned} \text{ระยะยกสูงสุด} &= \frac{P}{\rho g} \\ &= \frac{1.013 \times 10^5}{1000 \times 9.81} \\ &= 10.33 \text{ เมตร.} \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัตินั้นจะพบว่า ความดันของของเหลวในท่อทางดูดอาจต่ำกว่าความดันไอ (vapour pressure). แนวโน้มนั้นจะทำให้ของเหลวที่ท่อทางดูดเกิดไอ ทำให้ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องสูบน้ำได้. ความดันไอของของเหลวนี้คือ ความดันอิ่มตัว (saturated pressure) ของของเหลว. ความดันไอของของเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของเหลวขณะนั้น. กล่าวคือ ถ้าของเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความดันไอจะเพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้ระยะต่ำลงผลของอุณหภูมิของน้ำต่อระยะยก, ตามตารางที่ 5.

ตารางที่ 5. ผลของอุณหภูมิของน้ำต่อระยะยก

อุณหภูมิของน้ำ (°ซ.)	ความดันไอ (P_v)		ระยะยก $\{(P_{atm} - P_v) / \rho g\} = \text{m}$
	bar	m - น้ำ	
1	0.006	0.06	10.27
30	0.042	0.43	9.90
70	0.311	3.18	7.15
100	1.013	10.33	0.00

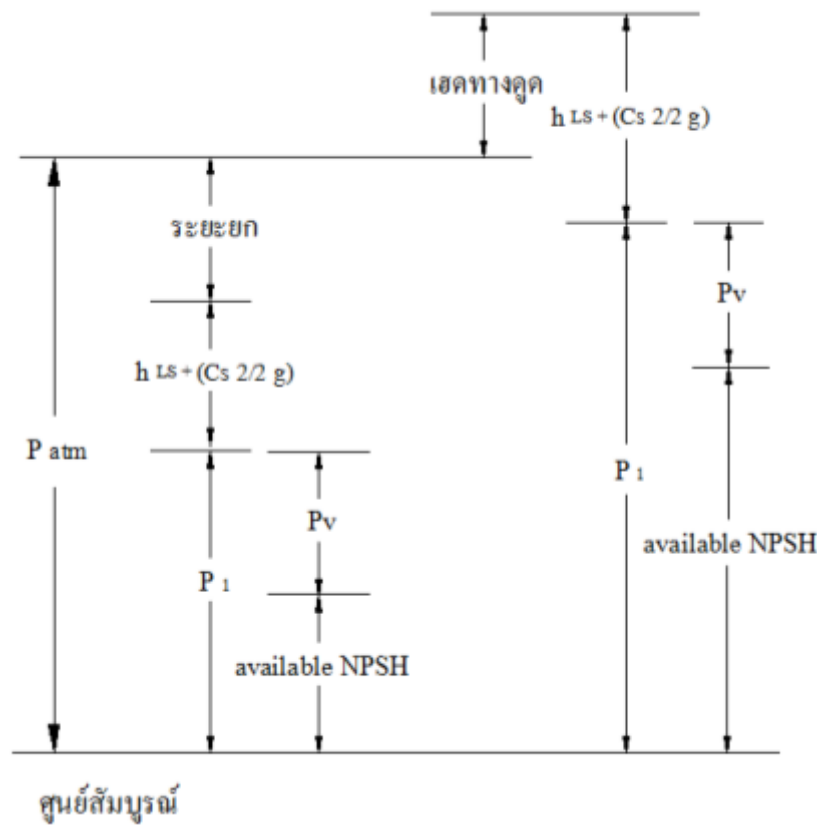
จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าที่ 100°ซ. นั้น เครื่องสูบน้ำไม่สามารถยกน้ำขึ้นได้ เนื่องจากน้ำด้านท่อทางดูดเป็นไอทั้งหมด.

การเกิดฟองไอในของเหลว (Cavitations)

การเกิดฟองไอในของเหลว เป็นผลมาจากการเกิดไอ เมื่อความดันในท่อทางดูดต่ำกว่าความดันไอของของเหลวขณะนั้น. ฟองไอจะเกิดการชนปะทะ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเครื่องสูบน้ำในบริเวณที่มีความดันสูงกว่า ทำให้บริเวณผิวของเครื่องสูบน้ำนั้นเกิดการกัดกร่อน. นอกจากนี้ ผลของการเกิดฟองไอจะก่อให้เกิดเสียงและการสั่นสะเทือนด้วย.

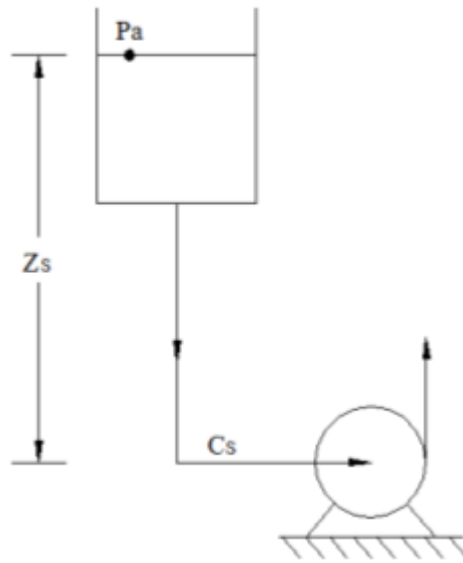
เฮดด้านดูดเป็นบวกสุทธิ (net positive suction head, NPSH)

เฮดด้านดูดเป็นบวกสุทธิ แบ่งออกเป็น required NPSH และ available NPSH สำหรับ required NPSH ก็คือ เฮดบวก (positive head) และมีหน่วยเป็นเมตร, วัดเทียบกับศูนย์สัมบูรณ์, สำหรับ NPSH นั้นจำเป็นต่อด้านดูดของเครื่องสูบ ทั้งนี้เนื่องจากจะช่วยป้องกันการเกิดฟองไอในเครื่องสูบนั่น. ในการออกแบบระบบท่อทางดูดของเครื่องสูบนั่นจะต้องคำนึงถึง NPSH ซึ่งรวมถึง ระยะยก (suction lift), ความสูญเสียในท่อทางดูด, เฮดพลังงานจลน์ในท่อทางดูด, ความดันไอของของเหลว ในท่อทางดูด NPSH คือ ความดันสัมบูรณ์ที่ทางเข้าเครื่องสูบ (P_1) ลบออกด้วยความดันไอของของเหลวในท่อทางดูด (P_v) ดังรูปที่ 62.



รูปที่ 62. เฮดด้านดูดเป็นบวกสุทธิ (NPSH).

ความดันสัมบูรณ์ที่ทางเข้าเครื่องสูบสามารถคำนวณหาได้จากสมการแบร์นูลลี, ซึ่งพิจารณาระหว่างผิวอิสระของของเหลวที่ปะปนเข้าท่อทางดูดและตรงเข้าท่อ, ดังรูปที่ 63.



รูปที่ 63. ความดันที่ทางเข้าเครื่องสูบ.

จากสมการแบร์นูลลี,

$$\frac{P_a}{\rho g} - h_{LS} + Z_s = \frac{C_s^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g}$$

จัดสมการใหม่,

$$\frac{P_a}{\rho g} = \frac{P_1}{\rho g} + Z_s - \frac{C_s^2}{2g} - h_{LS}$$

$$\text{available NPSH} = \frac{P_1 - P_v}{\rho g}$$

$$= \frac{P_a - P_v}{\rho g} + Z_s - h_{LS} - \frac{C_s^2}{2g}$$

- โดยที่
- P_a = ความดันสัมบูรณ์กระทำที่ผิวอิสระ (N/m^2),
 - P_1 = ความดันสัมบูรณ์ที่ทางเข้าเครื่องสูบ (N/m^2),
 - P_v = ความดันไอของของเหลว (N/m^2),
 - Z_s = เสดทางจุด (m) ถ้าเป็นระยะยก จะใช้เป็น ($-Z_s$),
 - C_s = ความเร็วของของเหลวในท่อทางจุด (m/s),
 - h_{LS} = ความสูญเสียความดันในท่อทางจุด (m).

$$\frac{P_a - P_v}{\rho g} = \text{ดูจากตารางที่ 5.}$$

เสดและอัตราการใช้ไพลเป็นปริมาณที่มีความสำคัญต่อการทำงานของเครื่องสูบลูกสูบที่เลือกใช้ในระบบท่อที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้แล้วการเลือกเครื่องสูบลูกสูบยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น required NPSH บริเวณติดตั้งใช้งาน, ราคาเครื่องสูบลูกสูบ, ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง, ค่าซ่อมบำรุง, ค่าใช้จ่ายขณะเครื่องสูบลูกสูบทำงาน, การบริการด้านอะไหล่, รวมถึงระดับเสียงของเครื่องสูบลูกสูบขณะใช้งาน.

1.6.6 ไอน้ำ (Steam) (ทักษิณเสถียร 2548)

ไอน้ำเป็นของเหลวที่มีพลังงาน โดยเฉพาะความร้อนอยู่เป็นจำนวนมากและเป็นของเหลวที่สามารถพาความร้อนในตัวเองไปแลกเปลี่ยนถ่ายเทความร้อนได้ง่าย, จึงนิยมใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับเพิ่มความร้อน. ดังนั้น เพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ระบบไอน้ำจะต้องออกแบบอย่างถูกต้องหลักวิศวกรรม.

ข้อพิจารณาในการออกแบบ

ในการออกแบบต้องคำนึงถึงความสามารถของระบบ 3 ส่วน ได้แก่ :

1) คุณภาพของไอน้ำ (steam quality) เพื่อให้ควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนของไอน้ำได้ดีและไม่มีน้ำปนไปกับไอน้ำจึงต้องทำให้ไอน้ำแห้งที่สุดซึ่งทำได้โดย :

1.1 การผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำต้องผลิตให้ได้ไอน้ำอิ่มตัว (saturated steam) ไม่มีน้ำปน โดยที่ตัวหม้อไอน้ำจะมี separator ไว้ดักน้ำ. ถ้าความเร็วของไอน้ำที่ออกจากผิวหน้าของน้ำมีค่าต่ำพอประมาณ 3 ฟุตต่ออนาที ไอน้ำจะแยกตัวออกจากน้ำโดยไม่มีการพาน้ำไปด้วย.

1.2 การดักแยกคอนเดนเสดที่เกิดจากการสูญเสียความร้อนของไอน้ำ (หยดน้ำ) ขณะส่งผ่านท่อเมนโดยใช้สตีมแทรปโดยปากทางเข้าสตีมแทรปจะต้องกว้างเพียงพอที่จะไม่ให้คอนเดนเสดไหลเข้าไป.

1.3 การดักแยกคอนเดนเสด (ละอองหยดน้ำ) ก่อนเข้าอุปกรณ์ต่างๆ ให้ใช้โดยอุปกรณ์แยกไอน้ำ (separator, strainer 100 mesh).

1.4 การเปลี่ยนแปลงความดันไอน้ำจากสูงเป็นต่ำ เกิดการคายความร้อนไปทำให้คอนเดนเสดที่ปนมากับไอน้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำหมด, ความร้อนนี้จะไปต่อต้านการควบแน่นของไอน้ำ.

1.5 การรักษาระดับแรงดันไอน้ำโดย regulator valve หรือ reducing valve เพื่อความสม่ำเสมอของคุณภาพไอน้ำ โดยต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไอน้ำจากหม้อไอน้ำ.

1.6 การเดินท่อไอน้ำให้มีแนวลาดเอียงเข้าหาต้นทางเพื่อป้องกันไม่ให้คอนเดนเสทไปกับไอน้ำ (1:100 ถึง 1:200).

1.7 ต่อท่อไอน้ำไปใช้งานจากด้านบนของท่อเมน เพื่อนำไปแต่ไอน้ำเท่านั้น.

2) ปริมาณของไอน้ำ (steam quantity) หมายถึง น้ำหนักของไอน้ำที่นำพาปริมาณความร้อนไปแลกเปลี่ยนให้ได้ตามต้องการ เนื่องจากไอน้ำเป็นของไหล จึงต้องพิจารณาในเทอมของปริมาตรต่อหน่วยเวลา ซึ่งจะสัมพันธ์กับน้ำหนักไอน้ำแตกต่างกันไปตามการเปลี่ยนแปลงเช่น:

2.1 ความดันไอน้ำจากคุณสมบัติของไอน้ำที่ความดันสูงจะมีปริมาณจำเพาะต่ำนั้น คือ ที่ความต้องการน้ำหนักไอน้ำเท่ากันที่ความดันไอน้ำสูงจะใช้ปริมาณไอน้ำน้อยกว่าที่ความดันต่ำ.

2.2 ความเร็วของไอน้ำจากอัตราการไหลเท่ากับพื้นที่หน้าตัดคูณความเร็วของไหลที่ท่อขนาดเดียวกัน. ถ้าต้องการปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น ต้องใช้ความเร็วของไอน้ำมากขึ้น. โดยปกติการออกแบบจะต้องกำหนดความเร็วของไอน้ำไว้ด้วยค่าเหมาะสม (สำหรับท่อเมน 20–25 m/s, ท่อสาขาใช้งานความเร็วสามารถเป็น 40 m/s ได้และในส่วนของ flash steam ควรใช้ความเร็ว 15 m/s) แล้วเลือกขนาดท่อและอุปกรณ์ (พื้นที่หน้าตัด) ให้ได้ปริมาตรต่อหน่วยเวลาตามต้องการ.

2.3 ขนาดของท่อสัมพันธ์กับแรงดันไอน้ำ ความต้องการสุดท้ายคือ น้ำหนักของไอน้ำต่อหน่วยเวลา ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณจำเพาะตามแรงดันที่เปลี่ยนไป และปริมาณไอน้ำต่อหน่วยเวลาสัมพันธ์กับขนาดของท่อ (ที่ความเร็วกำหนด). ดังนั้น อาจจะกล่าวได้ว่า เพื่อให้ได้น้ำหนักไอน้ำต่อหน่วยเวลาตามต้องการจะต้องออกแบบขนาดท่อสัมพันธ์กับแรงดันไอน้ำที่ผ่านท่อนั้น, ตามตารางที่ 6.

2.4 การวัดความบริสุทธิ์ของไอน้ำ เพื่อป้องกันปัญหาเรื่องตะกอนจับและการกัดกร่อนนั้น ควรวัดความบริสุทธิ์ของไอน้ำเป็นประจำ เพื่อตรวจหาร่องรอยต่างๆ ที่ติดไปกับไอน้ำ. ถ้าวิธีการปรับสภาพน้ำในหม้อไอน้ำได้มาตรฐาน จะไม่มีแคลเซียม, แมกนีเซียม, เหล็ก และทองแดงติดไปกับไอน้ำ. ส่วนสารเคมีอื่นที่ละลายในน้ำ หม้อไอน้ำจะถูกกลรูปเป็นรูปของโซเดียมเท่านั้น.

ร่องรอยที่เป็นของแข็งและของเหลวจะมีแต่เพียงฝุ่นละอองและละอองน้ำเท่านั้น ซึ่งในละอองน้ำจะมีแต่เกลือโซเดียมเป็นส่วนใหญ่. ร่องรอยเป็นก๊าซที่พบมาก ได้แก่ แอมโมเนีย, คาร์บอนไดออกไซด์, ไนโตรเจน, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ไฮโดรเจน, อะมีน และซิลิกา. โดยทั่วไปแล้วจะมีการวัดค่าโซเดียมไอออนมากที่สุด เนื่องจาก ปริมาณโซเดียมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสารทั้งหมด (TS) ของน้ำในหม้อไอน้ำและไอน้ำ.

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมกับสารละลายทั้งหมดให้ได้ค่าเป็นอัตราส่วนที่แน่นอน ค่าเฉลี่ยในกรณีทั่วไปจะเป็น 3, ซึ่งหมายถึงว่า ถ้าพบโซเดียมในไอน้ำ 0.1 ppm. แสดงว่ามีสารละลายอยู่ราว 0.3 ppm. และการวัดปริมาณโซเดียมในไอน้ำนิยมใช้เครื่องมือ 2 ชนิด ได้แก่ sodium ion analyzer และ sodium flame spectrophotometer.

ตารางที่ 6. Sizing Steam Pipes (kg/hr)

Pressure (bar)	Steam Velocity (m/s)	Capacity (kg/hour)										
		Nominal Pipe Size (mm)										
		25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250
0.4	15	24	37	52	99	145	213	394	648	917	1606	2590
	25	40	62	92	162	265	384	675	972	1457	2806	4101
	40	64	102	142	265	403	576	1037	1670	2303	4318	6909
0.7	15	25	40	59	109	166	250	431	680	1006	1708	2791
	25	45	72	100	182	287	430	716	1145	1575	2816	4629
	40	68	106	167	298	428	630	1108	1715	2417	4532	7251
1	15	29	43	65	112	182	260	470	694	1020	1864	2814
	25	48	72	100	193	300	445	730	1160	1660	3099	4869
	40	71	112	172	311	465	640	1150	1800	2500	4815	7333
2	15	45	70	100	182	280	410	715	1125	1580	2814	4545
	25	70	112	162	195	428	656	1215	1755	2520	4815	7425
	40	115	178	275	475	745	1010	1895	2925	4175	7678	11997
3	15	60	93	127	245	385	535	925	1505	2040	3983	6217
	25	100	152	225	425	632	910	1580	2480	3440	6779	10269
	40	157	250	357	595	1025	1460	2540	4050	5940	10479	16470
4	15	70	108	156	281	432	635	1166	1685	2460	4618	7121
	25	115	180	270	450	742	1080	1980	2925	4225	7866	12225
	40	197	295	456	796	1247	1825	3120	4940	7050	12661	1963
5	15	87	128	187	352	526	770	1295	2105	2835	5548	8586
	25	135	211	308	548	885	1265	2110	3540	5150	8865	14268
	40	225	338	495	855	1350	1890	3510	5400	7870	13761	23205

ที่มา : Ezing Steam Pipes (kg/n). 2020.

ปริมาณไอน้ำที่ใน กรณีฉีดตรง (Direct steam) นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = M_s \times h_g$$

$$= C_p \times M \times \Delta T$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนที่ใช้ (kJ/kg),

ΔT = อุณหภูมิที่สูงขึ้น ($^{\circ}\text{C}$),

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg- $^{\circ}\text{C}$),

M = ปริมาณของ Load (kg/หน่วยเวลา),

M_s = ปริมาณไอน้ำที่ใช้ (kg/หน่วยเวลา),

h_g = ค่าเอนทัลปีของไอน้ำที่แรงดันเลือกใช้งาน (kJ/kg).

ปริมาณไอน้ำที่ใน กรณีถ่ายเทโดยอ้อม (indirect steam) นั้นสามารถคำนวณได้จาก,

$$Q = M_s \times h_{fg}$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนที่ใช้ (kJ/kg),

h_{fg} = ค่าเอนทัลปีของไอน้ำที่แรงดันเลือกใช้งาน (Latent heat) (kJ/kg),

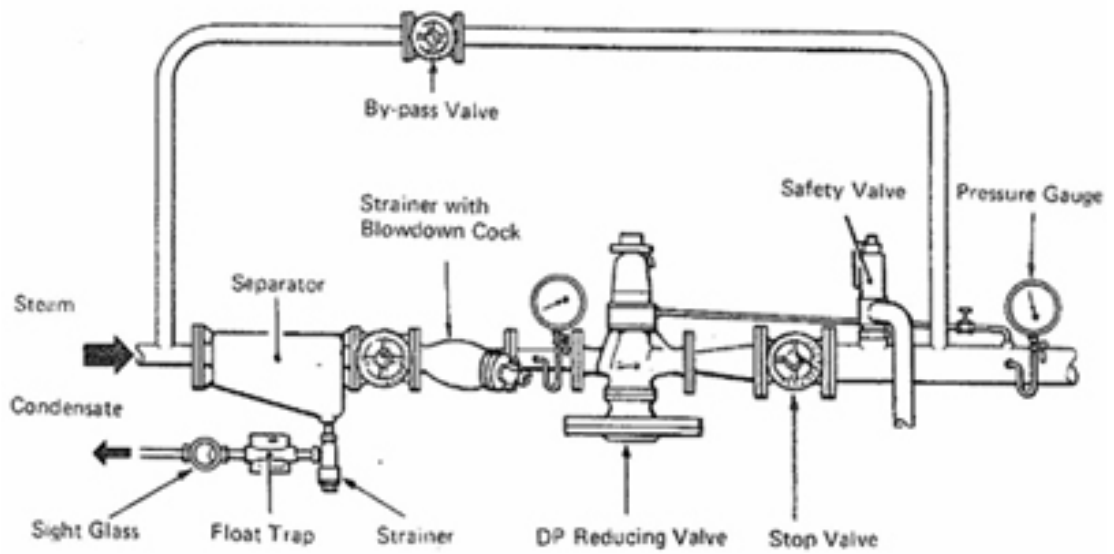
M_s = ปริมาณไอน้ำที่ใช้ (kg/หน่วยเวลา).

เมื่อได้ค่า h (Enthalpy) ตารางไอน้ำเทียบออกมาเป็นน้ำหนักไอน้ำที่ความดันเลือกใช้.

3) แรงดันไอน้ำ (Steam pressure) หมายถึง การกำหนดการสร้างแรงดันไอน้ำจากหม้อไอน้ำ การเปลี่ยนแปลงความดันไอน้ำ การเลือกใช้แรงดันไอน้ำเพื่อผลต่างๆ.

3.1 การกำหนดแรงดันไอน้ำของหม้อไอน้ำต้องให้มากกว่าค่าสูงสุดที่ต้องการใช้เสมอ ยิ่งมากเท่าใดเมื่อผ่านการลดแรงดันไอน้ำแล้วจะเกิดความแตกต่างแรงดันมากทำให้ไอน้ำแห้งยิ่งขึ้น.

3.2 การใช้วาล์วลดแรงดันไอน้ำ (Reducing valve) เพื่อรักษาระดับแรงดันใช้งานให้สม่ำเสมอและผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันยังทำให้ไอน้ำแห้งขึ้นมีคุณภาพดีขึ้น โดยไดอะแกรมการติควาล์วลดแรงดัน, ดังรูปที่ 64.



รูปที่ 64. ใตอะแกรมติดตั้งระบบวาล์วลดแรงดันก่อนใช้งาน.

อุปกรณ์อื่นๆ เช่น สติมแทรป เลือกใช้ตามคู่มือ โดยพิจารณาความดันที่แตกต่าง (ΔP) ระหว่าง steam Line กับ condensated Line หรือที่เรียกว่า back pressure และปริมาณคอนเดนเสดที่คาดว่าจะเกิดขึ้น. สติมแทรปจะต้องมีขนาดที่เหมาะสม โดยจะต้องสามารถรับปริมาณคอนเดนเสดขณะเริ่มได้ โดยกำหนดค่า safety factor ในการเลือกขนาดไว้, ตามตารางที่ 7.

ตารางที่ 7. ค่า Safety factor สำหรับการเลือก Steam trap ของแต่ละชนิด

Steam trap type	Safety factor
Balanced thermostatic steam trap	3.0
Bimetallic steam trap	2.5
Float steam trap	2.0
Inverted bucket steam trap	2.5
Liquid expansion steam trap	3.0
Thermodynamic steam trap	1.5

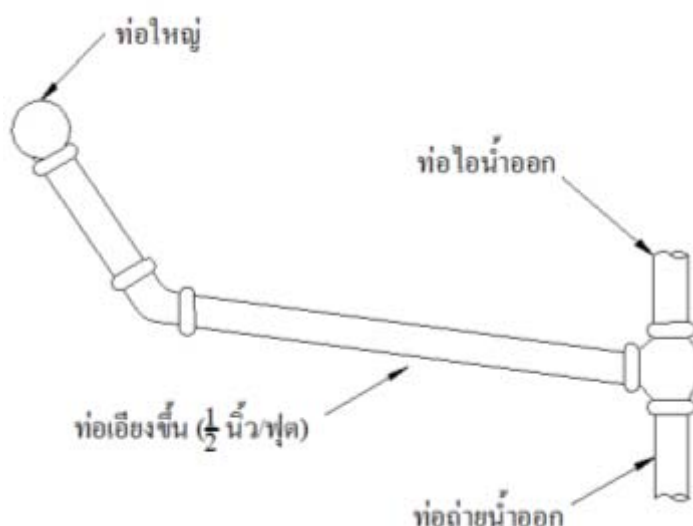
ตารางที่ 8. สัดส่วนความสามารถการระบายคอนเดนเสทที่ลดของกับดักไอน้ำเมื่อมี back pressure

Reduction in steam trap capacity (%)				
Inlet pressure		% Back pressure		
(psig)	(bar)	25	50	75
5	0.35	6	20	38
25	1.75	3	12	30
100	6.90	0	6	25
200	13.80	0	5	23

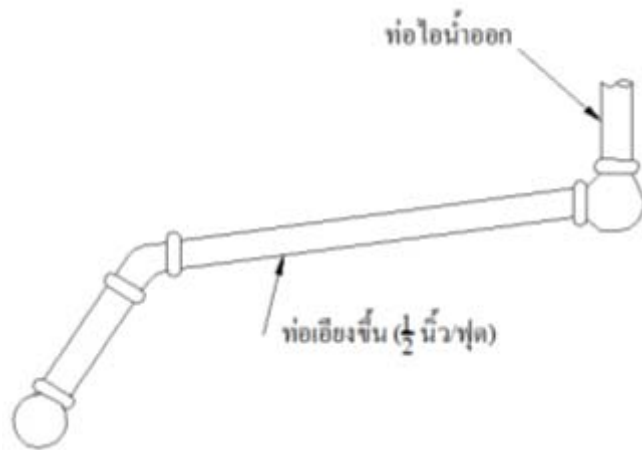
การจัดวางท่อระบบไอน้ำ

การเดินท่อไอน้ำมีปัญหาต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย เช่น ตำแหน่งอุปกรณ์, การกีดขวางจากสิ่งก่อสร้าง, การเดินท่อย้อนกลับ, การจัดวางสตีมแทรป, เป็นต้น.

การเดินท่อแยก ดังรูปที่ 65, ท่อที่แยกออกจากท่อหลักจะอยู่ข้างใต้ของท่อหลัก และท่อจะเดินลาดลงให้น้ำที่กลั่นตัวในท่อหลัก ไหลลงมาสู่ท่อดริป (Drip หมายถึง ท่อที่แยกเอาน้ำออกจากไอน้ำรูปที่ 65 จะเห็นได้ว่าไอน้ำจะขึ้นสู่ด้านบน ส่วนน้ำจะไหลลงด้านล่าง ซึ่งจะไปต่อกับท่อย้อนกลับหรือติดข้างสตีมแทรปได้). รูปที่ 66. ท่อแยกจะออกจากท่อหลักด้านบน เหมาะกับไอน้ำในท่อหลักเป็นไอแห้งไม่มีน้ำกลั่นค้างในท่อหลัก ท่อแยกจะลาดขึ้น.



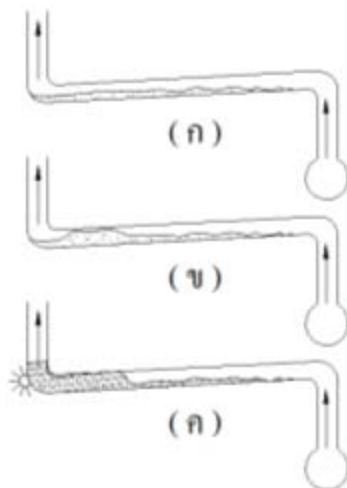
รูปที่ 65. การเดินท่อแยก (ท่อหลักเป็นไอน้ำที่กลั่นตัว).



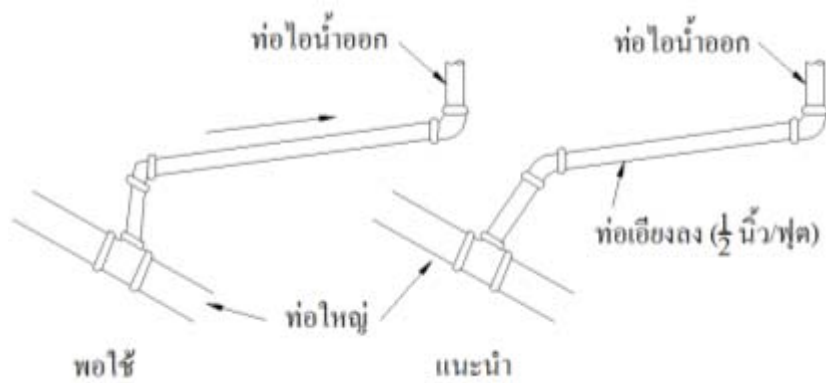
รูปที่ 66. การเดินท่อแยก (ท่อหลักเป็นไอแห้ง).

การป้องกันการกระแทก (hammering) ดังรูปที่ 65, หากไม่มีท่อแยกเอาน้ำออก น้ำจะขังอยู่ที่มุมท่อ ดังรูปที่ 67. เมื่อน้ำจุกเต็มท่อ ไอน้ำเดินไม่สะดวก จะเกิดการกระแทกขึ้น, ซึ่งมีอันตรายถึงขนาดข้อต่อหลุดได้. การป้องกันการกระแทกโดยการยึดหลักการดังนี้ :

- 1) ทำมุมเอียงของท่อให้เหมาะสม.
- 2) พยายามระบายน้ำที่ก้นตัวออก เช่น ดังรูปที่ 65.
- 3) เลือกขนาดท่อที่ใหญ่พอที่จะให้ความเร็วของไอน้ำไม่สูงมากนัก โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นไอน้ำเดินสวนทางกับการไหลของน้ำที่ก้นตัว เช่น ท่อไอน้ำในแนวตั้ง ไอน้ำเดินขึ้นแต่น้ำไหลลง.

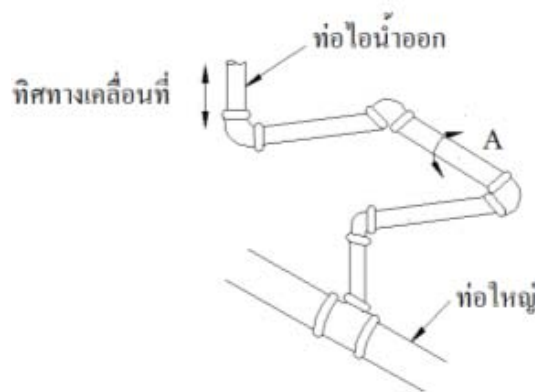


รูปที่ 67. น้ำที่จุกอยู่ตรงมุมท่อจะก่อให้เกิดแรงกระแทก.

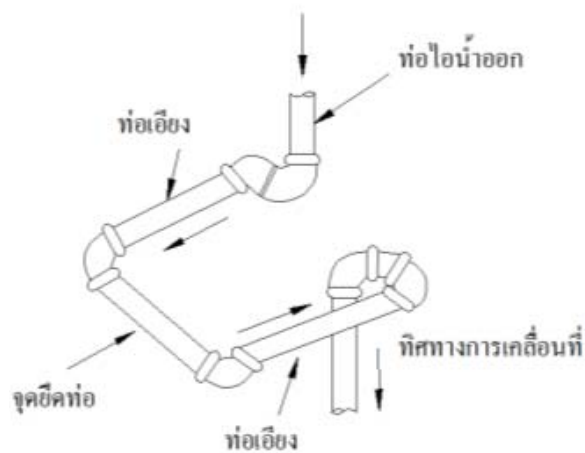


รูปที่ 68. ใช้ข้องอ 45°.

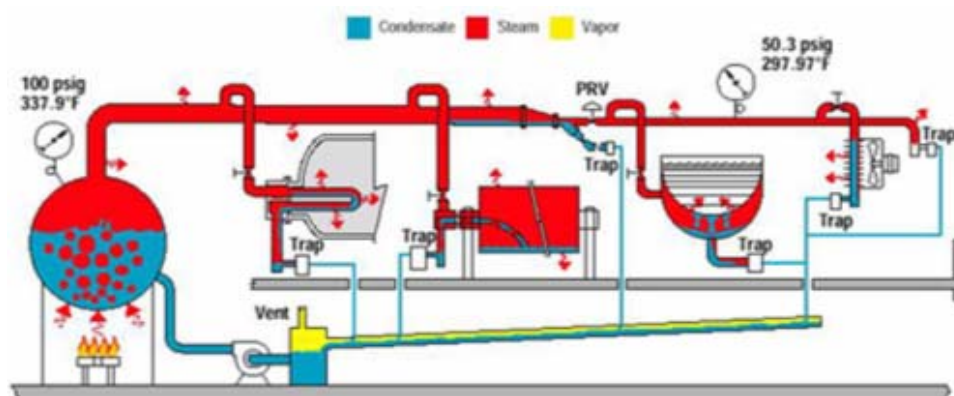
การป้องกันการการบิดตัว ในกรณีต้องเดินท่อตรงเป็นระยะทางยาวมากๆ จำเป็นต้องงอท่อ บางแห่ง เพื่อให้รับการบิดตัวอันสืบเนื่องมาจากการขยายตัวของท่อ, ดังรูปที่ 69 และ 70 จะสามารถ รับการขยับตัวของท่อในแนวตั้ง.



รูปที่ 69. การงอท่อเพื่อรับการบิดตัวเมื่อมีการขยายตัว.



รูปที่ 70. การงอท่อเพื่อรับการบิดตัวโดยการยึดที่จุดๆ หนึ่ง.



รูปที่ 71. การจัดเรียงอุปกรณ์ระบบไอน้ำ.

1.6.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารต้านอนุมูลอิสระมีบทบาทสำคัญในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่างๆ. ดังนั้น สารต้านอนุมูลอิสระจึงช่วยป้องกันโรคต่างๆ ที่มีสาเหตุจากการที่อนุมูลอิสระไปทำลายเซลล์. สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติเป็นสารที่มีความปลอดภัยมากที่สุดสำหรับผู้บริโภค. แหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ เช่น ผักพื้นบ้านและสมุนไพร เป็นต้น.

มะลิสุข (2548) กล่าวถึง กิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระของผักพื้นบ้าน และสมุนไพรไทยบางชนิดว่า ผักพื้นบ้านและสมุนไพรไทยที่มีกิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระสูง ได้แก่ กระถิน, ชะพลู, ผักชีล้อม, ผักเชียงดา, ผักปุย่า, ผักฮ้วนหมู, ฟ้าทลายโจร, สะเดา, สะระแหน่, หลู่ฮวาน, หม่อน, โหระพาช้าง, ซึ่งผักพื้นบ้านประเภทชะพลู, ฟ้าทลายโจร, สะเดา และสะระแหน่, เป็นสมุนไพรที่มีสรรพคุณทางยา.

มณีพิศมัย (254) กล่าวถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผักพื้นบ้านและสมุนไพรไทย โดยวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นหรือปริมาณของสารที่สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ 50% (IC_{50}). ผลการศึกษาพบว่า ผักพื้นบ้านและสมุนไพรไทยส่วนใหญ่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง และในจำนวนผักพื้นบ้านและสมุนไพรไทยที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด 10 อันดับ ในจำนวนตัวอย่างที่ศึกษา 100 ชนิด ได้แก่ ใบมันปู, ผักเม็ก, ใบมะม่วงหิมพานต์, ดอกกระเจียว, ผักปุย่า, สะเดา, ใบเล็บครุฑ, ใบมะกอก, ใบมะขม และใบคิ้ว, ตามลำดับ. (IC_{50}) เท่ากับ 0.72-0.852 มก./มล.

สุขวิถิ (2544) ศึกษาสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเมธานอลจากผักพื้นบ้านและสมุนไพรไทย คำนวณออกมาเป็นค่า Antioxidant index. โดยคำนวณจากอัตราการฟอกสีของ บีตา-แคโรทีน คำนวณจากความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร ระหว่างเวลาเริ่มต้น (0) และเวลาสุดท้ายที่อ่านได้ค่าคงที่หารด้วยเวลา. ผลการศึกษาว่าสมุนไพรแห้งชนิดต่างๆ มีค่า Antioxidant index เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ ชะพลู (12.27), ฟ้าทะลายโจร (7.51), บัวบก (7.10), กวาวเครือ (6.54), ชุมเห็ดเทศ (6.15), รางจืด (6.11), พญาปล้องทอง (5.39), มะตูม (5.29), เถย (5.25), เถาวัลย์ (เปรียง) (4.74), ชะเอมไทย (4.39), ทองพันชั่ง (3.87), มะขามแขก (3.42), คำฝอย (3.39), ข่า (3.24), ส้มป่อย (3.14), ว่านน้ำ (2.76), ย่านาง (2.63), พลุควา (2.17), กระทือ (2.09), จิง (2.00), จี่เหล็ก (1.92), บอระเพ็ด (1.53), ผลมะระจืด (1.49), กะเม็ง (1.35), กำจัดต้น (1.35), กานพลู (1.31), กระจ่าง (1.02) และว่านชักมดลูก (0.80).

ผักเชียงดา

ชื่อวิทยาศาสตร์	: <i>Gymnema inodorum</i> Decne.
วงศ์	: Asclepiadaceae
ชื่อพื้นเมือง	: ผักเชียงดา (ภาคเหนือตอนบน)



ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ผักเชียงดาเป็นไม้เถาเลื้อย, ความยาวของเถาเลื้อยไปได้ไกลขึ้นกับอายุของไม้ต้น. ลำต้นสีเขียว ทุกส่วนของต้นที่อยู่เหนือดิน, มียางสีขาว, ขนาดของลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-5.0 ซม. ใบเป็นใบเดี่ยว, สีเขียวเข้ม, หน้าใบสีเขียวเข้มมากกว่าหลังใบ, ขอบใบเรียบหรือมีคลื่นเล็กน้อย, ใบมีรูปร่างกลมรี, ปลายแหลม ฐานใบแหลม, ใบมีก้านยาว 3.5-6.0 ซม. ใบกว้าง 9.0-11.0 ซม. ยาว 14.5-18.5 ซม. ผิวใบเรียบ, ไม่มีขน, ใบออกจากข้อ, เรียงเป็นคู่ตรงข้ามกัน.

ประโยชน์ทางยา

ในตำราไทยไม่มีการบันทึกสรรพคุณทางยาของผักเชียงดา, ส่วนทางเหนือใช้ใบของผักเชียงดาตำละเอียดแล้วนำมาพอกกระหม่อม รักษาไข้, อากาศหัด หรือนำไปประกอบในตำรับยาแก้ไข้. ผักเชียงดาเป็นสมุนไพรที่มีสรรพคุณลดน้ำตาลในเลือด และมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นยารักษาโรคเบาหวาน.

ประโยชน์ทางอาหาร

ผักเชียงดาเป็นผักที่ชาวเหนือนิยมรับประทาน อาจรับประทานเป็นผักสดโดยนำไปแกล่อมกับ ส้มตำมะม่วง, ลาบ, หลู้. แต่ส่วนมากจะนำยอดอ่อนและใบอ่อนมาแกงกับปลาแห้ง. ผักเชียงดาเป็น ผักอย่างหนึ่งที่ปรุงเป็นแกงแค. ชาวเหนือนิยมนำผักเชียงดา, ผักชะอม และผักเสี้ยวแกงรวมกัน. นัย ว่า แกงรวมกันแล้วมีรสอร่อย หรือผักเชียงดา, ผักคืด และปลีกกล้วย แกงรวมกันจะทำให้ผักคืดไม่ขม (สำนักงานคณะกรรมการสาธารณสุขมูลฐาน 2540).

2. เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

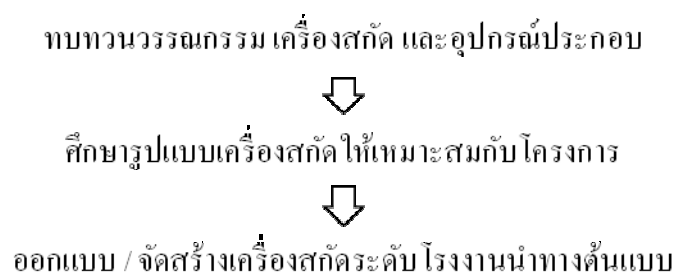
2.1 เครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์

1. สร้างเครื่องสกัดสารต้านอนุมูลอิสระต้นแบบระดับโรงงานนำทางขนาดกำลังการผลิต 100 ลิตร.
2. ตรวจวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Photochemiluminescence (PCL).
3. เครื่องตรวจวัดค่าสี Minolita Chroma Meter รุ่น CR-310 บริษัท Konica-Minolta Corporation, Osaka, Japan.
4. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer).
5. วัสดุคิบฝักเชียงดาแห้ง.

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ด้านวิศวกรรม และด้านการทดลอง ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสกัด.

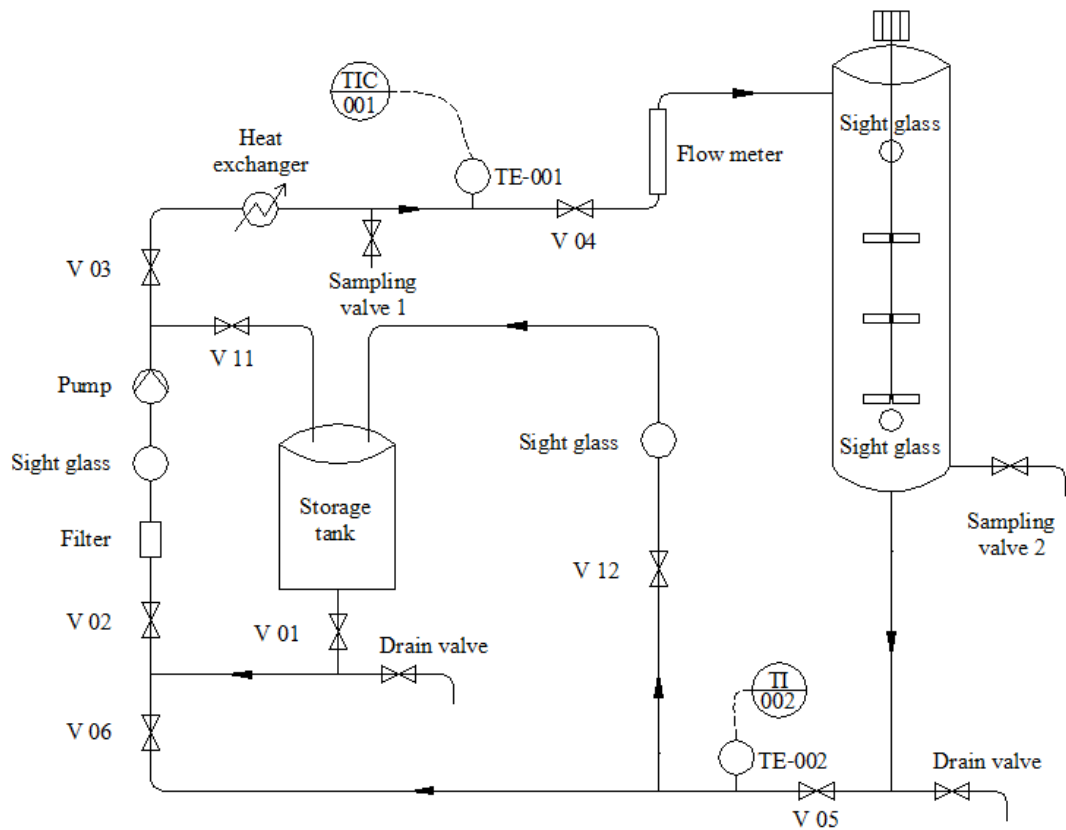
ด้านวิศวกรรม (Engineering)



การออกแบบด้านกระบวนการ

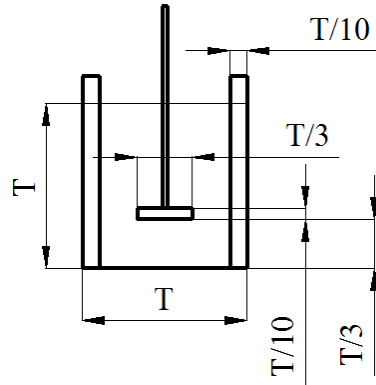
1. ใช้กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบต่อเนื่อง (Continuous Solid-liquid extraction).

2. วิธีการสกัดต้องอุ่นตัวทำละลาย (น้ำ) ให้ได้อุณหภูมิตามต้องการก่อน จากนั้นใส่วัตถุคิบ (ผักเชียงดาแห้ง) ในหอสกัด.
3. ตัวทำละลายใช้ น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำผสมแอลกอฮอล์.
4. อุณหภูมิการสกัดตั้งแต่ 50-100⁰ซ.
5. ความเร็วรอบใบกวน 1 - 300 รอบต่อนาที.
6. เวลาการสกัด 5-60 นาที.
7. อัตราการไหลวน (Circulation) 50 - 150 ลิตรต่อชั่วโมง (l/hr).
8. อุปกรณ์ทั้งกระบวนการใช้อุปกรณ์ ระดับ IP 65.
9. ท่อ วาล์ว และอุปกรณ์ประกอบใช้อุปกรณ์ระดับ Food grade.



รูปที่ 72. แบบแสดงกระบวนการสกัด.

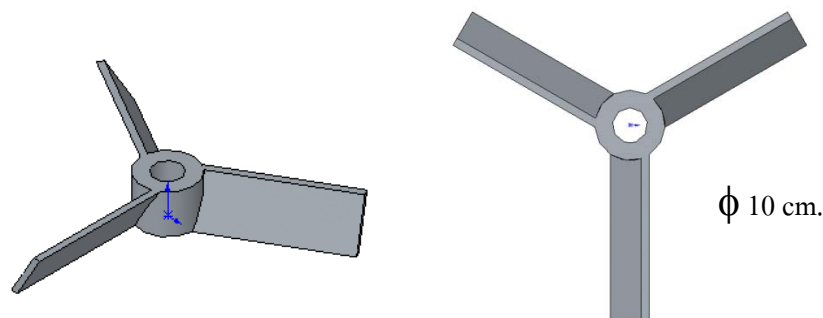
ออกแบบหอสกัดแบบมีครีبدังรูปที่ 73



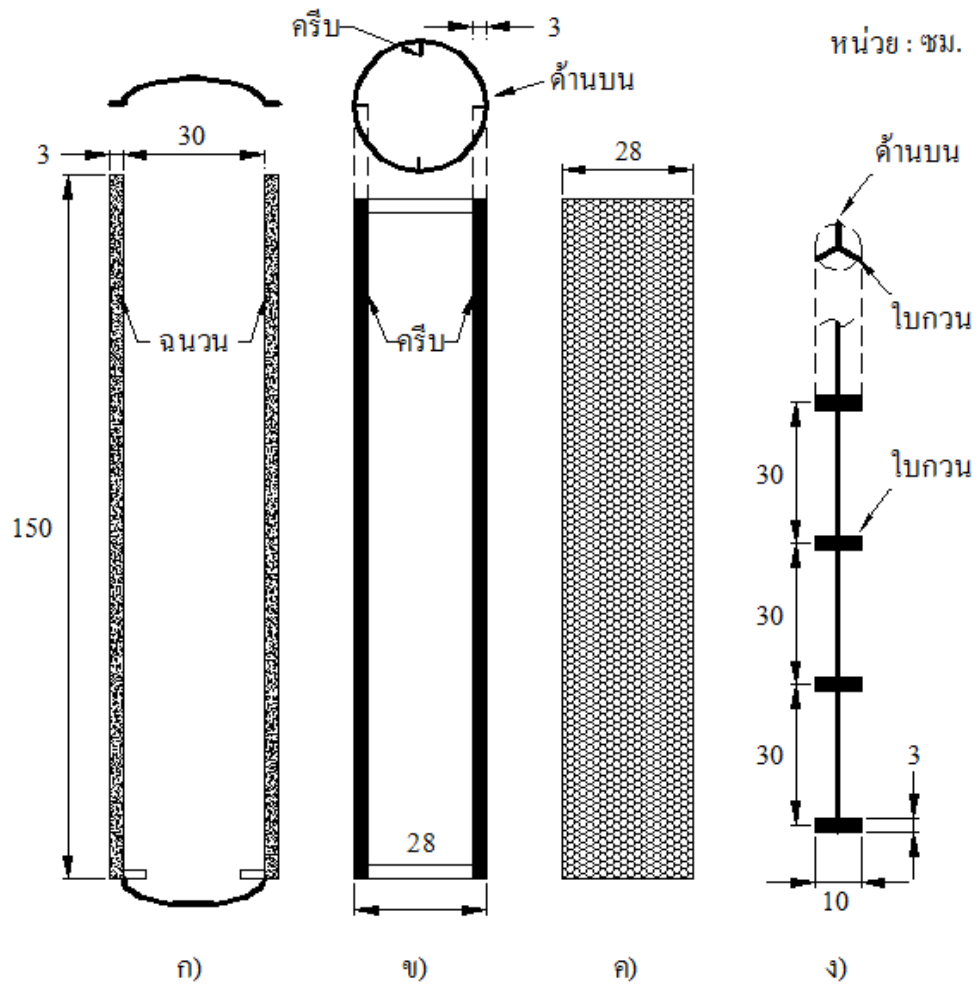
รูปที่ 73. สัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างใบกวนกับหอสกัดแบบมีครีป.

การออกแบบหอสกัด

1. หอสกัดขนาด 100 ลิตร.
2. เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 30 ซม. สูง 150 ซม. ผนังหุ้มฉนวนกันความร้อนหนา 3 ซม. ดังรูปที่ 75 ก).
3. โครงตะแกรงใส่วัสดุดีบสามารถยกออกทำความสะอาดได้ง่าย, ภายในมีครีปทั้ง 4 ทิศยาวตลอดความสูง ขนาดครีป 3 ซม. ดังรูปที่ 75 ข).
4. ตะแกรงกรองวัสดุดีบภายในหอสกัด ความละเอียด 80 เมช หุ้มรอบโครงตะแกรงและด้านล่าง ดังรูปที่ 75 ค).
5. ใบกวนแบบ 3 ใบ ทำมุม 120° , ϕ 10 ซม., หนา 3 ซม. ดังรูปที่ 74. วางสูงจากกันตะแกรง 10 ซม. แต่ละชั้นใบกวนห่างกัน 30 ซม. ดังรูปที่ 75 ง), ใบกวนสามารถเลื่อนปรับระดับได้.



รูปที่ 74. ใบกวน.



รูปที่ 75. แบบแสดงส่วนท่อสกัด.

ด้านการทดลอง และทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสกัด (Experiments and efficiency test)

การออกแบบการทดลอง

ทบทวนวรรณกรรมด้านการสกัดระดับโรงงานนำทาง



ศึกษารูปแบบการสกัดระดับ โรงงานนำทางให้เหมาะสมกับโครงการ



ออกแบบการสกัด และทดลอง



สร้างสารสกัดอ้างอิงในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ผักเชียงดาแห้ง

ปริมาณวัสดุดิบ 0.2 % w/w จำนวน 3 ตัวอย่าง

เพื่อหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และค่าสี



ดำเนินการสกัดจากเครื่องสกัดสารด้านๆ ด้านแบบ แปรปัจจัย ได้แก่

1. ปริมาณวัสดุดิบ (ผักเชียงดาแห้ง) 0.2 % , 0.35 % และ 0.5 % w/w
2. กำหนดอุณหภูมิตัวทำละลาย 75 °C , 85 °C และ 95 °C (-/+ 1.5 °C)
3. ความเร็วรอบการสกัด 50, 100 และ 150 รอบต่อนาที (rpm).
4. ปรับระดับใบกวน 20 และ 30 ซม.
5. อัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง



ต้มตัวทำละลาย (น้ำ) ตามอุณหภูมิที่กำหนด โดยเก็บไว้ที่ หอสกัดในปริมาณ 50 ลิตร



เมื่อได้อุณหภูมิความต้องการ แล้วนำตัวถูกละลาย (ผักเชียงดาแห้ง) ใส่ยังหอสกัด



ดำเนินการไหลวนและหมุนใบกวน ตลอดระยะเวลาสกัด



สุ่มเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น (0 นาที)

ส่งตรวจวิเคราะห์ ทาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และค่าสี



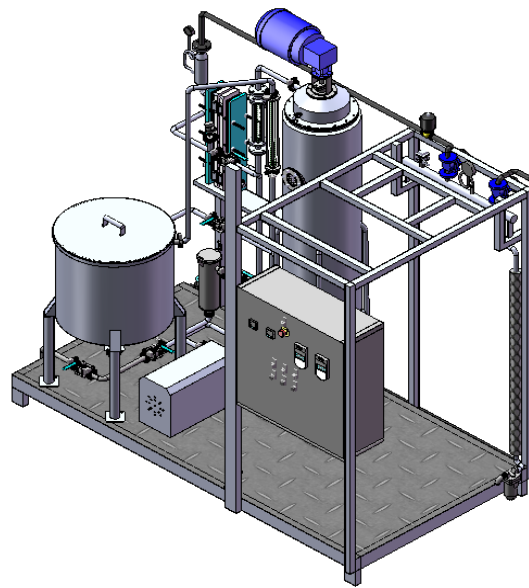
ทวนสอบเครื่องสกัดฯ



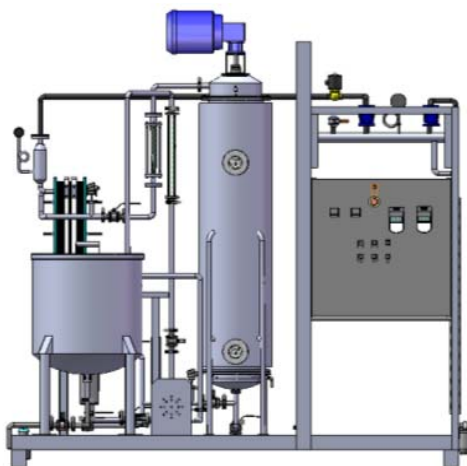
สรุปผลการทดลองเทียบกับสารสกัดอ้างอิง ระดับห้องปฏิบัติการ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

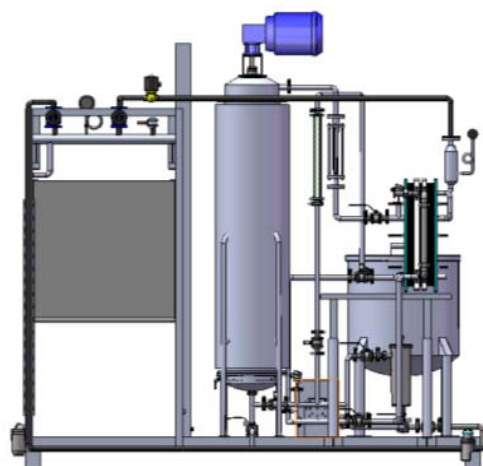
เครื่องสกัดสารต้านอนุมูลอิสระต้นแบบนี้ สามารถเคลื่อนย้ายสะดวกเนื่องจากมีขนาด 120 x 240 x 250 ซม. (กxยxส), น้ำหนักประมาณ 450 กก., ความจุการสกัด 100 ลิตร, ระยะเวลาการสกัดผักเชียงดาประมาณ 2:30 ชั่วโมง. สามารถเปลี่ยนตะแกรงกรองเศษวัตถุดิบได้ และใช้ตัวทำละลายได้ทั้งน้ำหรือน้ำผสมแอลกอฮอล์, ถอดทำความสะอาดง่าย.



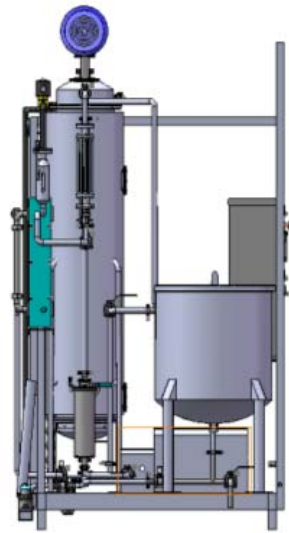
รูปที่ 76. เครื่องสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ.



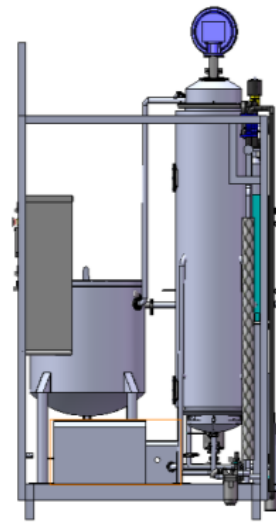
รูปที่ 77. ด้านหน้าเครื่องสกัด.



รูปที่ 78. ด้านหลังเครื่องสกัด.



รูปที่ 79. ด้านซ้ายเครื่องสกัดฯ.



รูปที่ 80. ด้านขวาเครื่องสกัดฯ.

3.1 ผลการทดลอง

ค่าอ้างอิงจากห้องปฏิบัติการเพื่อใช้อ้างอิงประกอบด้วย ค่าสี (Lab) และค่าตรวจวัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี photochemiluminescence (PLC) อัตราส่วนผักเชียงดาแห้ง 0.35% อุณหภูมิการสกัดที่ 90°C. ($\pm 1.5^{\circ}\text{C}$.) ใช้เวลาการสกัด 3 นาที แสดงตามตารางที่ 9.

ตารางที่ 9. ค่าสีและ ACW Antioxidant activity ของน้ำผักเชียงดาอ้างอิง

รายการ	เวลา (นาที)	อัตราส่วนผัก เชียงดาแห้ง	ค่าสี			% Acidity	Anti activity (vit C equ : n mol / 15 ug)
			L	a	b		
อ้างอิง	3	0.35 %	57.50	-1.74	24.27	0.030	2.1294

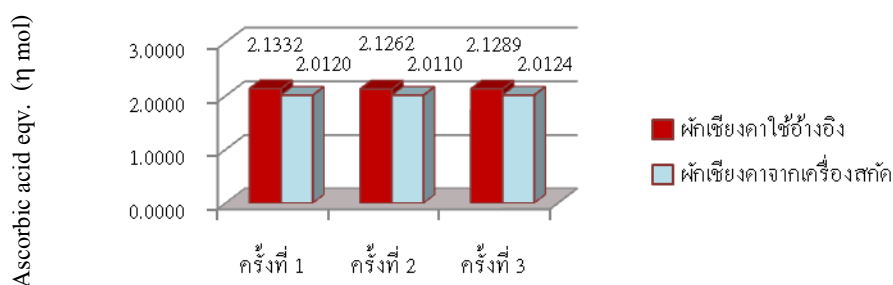
หมายเหตุ : ค่าที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ย

ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดผักเชียงดาแห้งจากเครื่องสกัดฯ ซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงจากห้องปฏิบัติการ แสดงตามตารางที่ 2.

ตารางที่ 10. ค่าสีและ ACW Antioxidant activity ของน้ำผักเชียงดาแห้งสอบเทียบ อุณหภูมิการสกัด ที่ 95°C. ($\pm 1.5\%$)

รายการ	เวลา (นาท)	อัตราส่วนผัก เชียงดาแห้ง	ค่าสี			% Acidity	Anti activity (vit C equ : n mol / 15 ug)
			L	a	b		
ตัวอย่างที่ 1	8-10	0.20 %	57.32	-1.65	24.01	0.032	2.0118
ตัวอย่างที่ 2	5-7	0.35 %	57.37	-1.82	25.46	0.031	2.0012
ตัวอย่างที่ 3	3-5	0.50 %	56.84	-1.34	25.23	0.032	2.0221

หมายเหตุ : ค่าที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ย



หมายเหตุ : ค่าที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ย

รูปที่ 81. ACW Antioxidant activity ของน้ำผักเชียงดา.

ผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมต่างๆ เมื่อสอบเทียบกับผลค่าอ้างอิงจากห้องปฏิบัติการ ตามตารางที่ 1.

ตัวอย่างที่ 1 อัตราส่วนผักเชียงดาแห้งร้อยละ 0.20, เวลาการสกัดที่เหมาะสม 8-10 นาที, ความเร็วรอบใบกวน 100 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 20 เซนติเมตร, อัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อ ชั่วโมง, อุณหภูมิการสกัด 95°C. ($\pm 1.5\%$).

ตัวอย่างที่ 2 อัตราส่วนผักเชียงดาแห้งร้อยละ 0.35, เวลาการสกัดที่เหมาะสม 5-7 นาที, ความเร็วรอบใบกวน 100 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 20 เซนติเมตร, อัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อ ชั่วโมง, อุณหภูมิการสกัด 95°C. ($\pm 1.5\%$).

ตัวอย่างที่ 3 อัตราส่วนผักเชียงดาแห้งร้อยละ 0.50, เวลาการสกัดที่เหมาะสม 3-5 นาที, ความเร็วรอบใบกวน 100 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 20 เซนติเมตร, อัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง, อุณหภูมิการสกัด 95°C. (+/- 1.5°C.).

3.2 วิจารณ์การวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและใช้ผักเชียงดาแห้งเป็นตัวถูกละลาย ซึ่งตัวถูกละลายผ่านกระบวนการให้ความร้อน อันอาจทำให้คุณสมบัติของสารบางอย่างสูญเสียไปกับการให้ความร้อน. เครื่องสกัดฯ ในโครงการวิจัยนี้ ถูกออกแบบให้สามารถใช้ได้ทั้งตัวทำละลายประเภทน้ำหรือน้ำผสมแอลกอฮอล์, ส่วนตัวถูกละลายสามารถใช้ได้ทั้งวัตถุดิบสดและแห้ง. ผลการวิจัยจากห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า ผักสดจะให้คุณสมบัติต่างๆ ของตัวถูกละลายคงอยู่แต่ก็ต้องมีปัจจัยอย่างอื่นประกอบด้วย เช่น ช่วงเวลาการเก็บก่อนจะนำมาสกัด, วิธีการเก็บรักษา, อายุของวัตถุดิบ, รวมถึงประเภทของวัตถุดิบ เช่น ส่วนยอด, ใบ, ก้าน, เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อค่าสีและค่าของสารต้านอนุมูลอิสระ.

การวิจัยนี้ไม่สามารถทดลองด้วยตัวทำละลายประเภทน้ำผสมแอลกอฮอล์เนื่องจากสถานที่ในการวิจัย ไม่ได้ถูกออกแบบให้สามารถทดลองด้วยวัตถุหรือสารเคมีที่มีความไวไฟ. การวิจัยนี้จึงขาดการทดลองด้วยตัวทำละลายดังกล่าว. อีกประการหนึ่ง ชนิดวัตถุดิบในการวิจัยนี้ ไม่ได้ทดลองด้วยผักสด เนื่องจากแหล่งวัตถุดิบส่วนใหญ่อยู่ทางภาคเหนือ. แต่เครื่องสกัดฯ นี้ถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยสามารถเคลื่อนย้ายด้วยรถบรรทุกหกล้อ จึงทำให้สามารถย้ายการวิจัยนี้ให้สามารถอยู่ใกล้แหล่งวัตถุดิบได้.

4. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต ผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ ในระดับห้องปฏิบัติการสู่โรงงานนำทาง หรือระดับชุมชน และเป็นแหล่งถ่ายทอดเทคโนโลยีนวัตกรรมเครื่องจักรแปรรูปกระบวนการผลิต, ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเสริมสุขภาพสู่เชิงพาณิชย์. ผลการวิจัยนี้เห็นได้ว่า เครื่องสกัดฯ สามารถสกัดสารต่างๆ ซึ่งให้ค่าคุณสมบัติทางด้านสี (Lab) และ ACW Antioxidant activity ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ. โดยสภาวะการสกัดในห้องปฏิบัติการ เช่น อัตราส่วนผักเชียงดาแห้งร้อยละ 0.35, อุณหภูมิการสกัดที่ 90°C. (+/- 1.5°C.) ใช้เวลาการสกัด 3 นาที. ส่วนสภาวะการสกัดจากเครื่องสกัดฯ อัตราส่วนผักเชียงดาแห้งร้อยละ 0.35, อุณหภูมิการสกัด 95°C. (+/- 1.5°C.) เวลาการสกัดที่เหมาะสม 5-7 นาที, ความเร็วรอบใบกวน 100 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 20 เซนติเมตร, อัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง, เป็นต้น.

ผลที่ได้จากสภาวะดังกล่าวค่าสี (Lab) และ Anti activity (vit C equ : n mol / 15 ug) ได้แก่ 57.50, (-1.74), 24.27 และ 2.1294, ตามลำดับ. ส่วนจากเครื่องสกัดจะได้อีก 57.37, (-1.82), 25.46 และ 2.0012, ตามลำดับ.

บรรณานุกรม

- ก้าวกสิกรรม, ตระการ. 2546. เครื่องกล ชุดที่ 10: การวัดการไหล, กรุงเทพฯ, หจก.นำอักษรการพิมพ์.
ไชยเรืองศรี, ธรณินทร์. ม.ป.ป. การสกัดของแข็ง-ของเหลว. กรุงเทพฯ, ม.ป.ท.
ทองสมบุรณ์, มารุต. 2535. การกวนของเหลว. กรุงเทพฯ: ม.ป.ท.
ทักษิณเสถียร, ศักดิ์ชัย. 2548. ระบบท่อ วาล์ว ป้อน: การออกแบบท่อไอน้ำ, กรุงเทพฯ, หจก.นำอักษร
การพิมพ์.
เนาวรัตน์วัฒนา, วัฒนาและบุญศิริ, พัชรี. 2542. โปรออกซิแดนซ์: อีกโฉมหน้าของแอนติออกซิแดนซ์,
วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
บุญสุนิต, ฉายศรี. ม.ป.ป. สีพีช. กรุงเทพฯ, ม.ป.ท.
พิรุณเกษตร, มนต์รี. 2546. เครื่องกล ชุดที่ 11: เครื่องสูบ, กรุงเทพฯ, หจก.นำอักษรการพิมพ์.
มณีพิศมัย, เยี่ยมศิริ. 2546. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผักพื้นบ้านและสมุนไพร, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์
สถาบันราชภัฏจันทรเกษม.
มะลิสุข, ยูพา. 2548. คุณค่าผักพื้นบ้านมากกว่าการบริโภค, กรุงเทพฯ, ม.ป.ท.
สำนักงานคณะกรรมการสาธารณสุขมูลฐาน. 2540. ผักพื้นบ้าน : ความหมายและภูมิปัญญาของ
สามัญชนไทย, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.
สุขวิถิ, ชนา. 2544. การตรวจหาและบ่งชี้ชนิดสารต้านอนุมูลอิสระจากผักพื้นบ้านและสมุนไพร.
กรุงเทพฯ, ม.ป.ท.
สุวดี โลวีกรณ. 2549. อาหารต้านอนุมูลอิสระกับสุขภาพ, *วารสารศูนย์บริการวิชาการ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น*.
หาญสืบสาย, อรัญ. ม.ป.ป. การสื่อสารสื่ออย่างแม่นยำ: การวัดสีในการสกัด, กรุงเทพฯ, ม.ป.ท.
Basu, T. K., Temple. N. J. and Garg, M. L., 1999. Antioxidants in Human Health and
Disease. UK, CABI Publishing.
Eizing Steam Pipes (kg/h). 2010. [online]. Available at : <http://>[accessed 20 September
2010].
Holland, F. A. and Chapman, F. S., 1966. Liquid Mixing and Processing in Stirred
Tanks. U.S.A., Reinhold Publishing Corporation.
Packer, L., Hiramatsu, M. and Yoshikawa, T., 1996. Antioxidant Food Supplements
in Human Health. U.S.A., Academic Press.
Roberfroid, M. B. and Calderon, P. B., 1995. Free Radicals and Oxidation Phenomena
in Biological System. New York, U.S.A. Merceel Dekker, Inc.
Steven, I. B. and Harry, S., 1997. Oxidant, Antioxidants, and Free Radicals.
Washington, DC. U.S.A., Taylor & Francis.
www.energysolutionscenter.org
www.engineeringtoolbox.com/steam-pipes-sizes-d_258.html

ภาคผนวก ก

ค่าสีน้ำผักเชียงดาอ้างอิงจากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1. ตัวแปรควบคุม อัตราส่วนผักเชียงดาแห้ง 0.2 % อุณหภูมิการสกัดที่ 90 °ซ. ($\pm 1.5^{\circ}$ ซ.)

เวลา (นาที)	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
2	67.52	-2.51	15.23	67.57	-2.54	15.33	67.54	-2.60	15.27
3	60.32	-2.10	18.02	60.56	-2.17	18.12	60.45	-2.14	18.20
5	57.46	-1.78	24.28	57.86	-1.71	24.38	57.61	-1.75	24.48

ตารางที่ 2. ตัวแปรควบคุม อัตราส่วนผักเชียงดาแห้ง 0.35 % อุณหภูมิการสกัดที่ 90°ซ. ($\pm 1.5^{\circ}$ ซ.)

เวลา (นาที)	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
2	67.46	-2.48	18.28	67.56	-2.51	18.11	67.40	-2.46	18.22
3	57.45	-1.76	24.26	57.41	-1.71	24.12	57.42	-1.72	24.21
5	52.46	-1.58	26.18	52.51	-1.45	26.21	52.38	-1.51	26.25

ตารางที่ 3. ตัวแปรควบคุม อัตราส่วนผักเชียงดาแห้ง 0.5 % อุณหภูมิการสกัดที่ 90 °ซ. ($\pm 1.5^{\circ}$ ซ.)

เวลา (นาที)	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2			ตัวอย่างที่ 3		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
2	57.41	-1.72	24.25	57.44	-1.74	24.22	57.47	-1.73	24.23
3	55.32	-1.18	26.10	55.43	-1.17	26.35	55.39	-1.12	26.31
5	50.51	-0.78	28.45	50.23	-0.69	28.35	50.31	-0.72	28.34

ตารางที่ 4. ค่าที่ใช้ในการอ้างอิง อัตราส่วนผักเชียงดาแห้ง 0.35 % อุณหภูมิการสกัดที่ 90 °ซ. (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	L	a	b
3	57.50	-1.74	24.27

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1 ตัวแปรควบคุมได้แก่ ความเร็วรอบใบกวน 50 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 30 เซนติเมตร และอัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 1.1 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.20 % และตามช่วงอุณหภูมิ ($\pm 1.5^{\circ}\text{ซ.}$)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	63.76	- 2.48	11.14	62.88	- 1.64	14.34	58.66	- 1.60	21.57
	63.75	- 2.47	11.12	62.83	- 1.62	14.38	58.56	- 1.59	21.59
	63.74	- 2.53	11.15	62.78	- 1.63	14.43	58.76	- 1.58	21.53
5	60.68	- 2.29	19.61	60.41	- 1.52	21.98	56.16	- 1.50	22.18
	60.67	- 2.28	19.57	60.53	- 1.53	21.89	56.38	- 1.51	22.21
	60.70	- 2.25	19.63	60.35	- 1.54	22.01	56.39	- 1.51	22.17
10	58.71	- 1.94	21.69	58.78	- 1.34	22.34	55.49	- 1.21	22.48
	58.66	- 1.93	21.76	58.83	- 1.23	22.27	55.60	- 1.25	22.44
	58.63	- 1.93	21.71	58.80	- 1.35	22.30	55.66	- 1.24	22.39
15	57.77	- 1.79	22.39	58.42	- 1.12	23.15	54.42	- 0.89	23.21
	57.75	- 1.81	22.41	58.52	- 1.01	23.07	54.46	- 0.89	23.17
	57.72	- 1.79	22.46	58.42	- 1.13	23.14	54.45	- 0.87	23.23
20	57.32	- 1.66	23.07	58.06	- 0.81	23.55	53.78	- 0.78	23.49
	57.35	- 1.69	23.13	58.02	- 0.81	23.49	53.64	- 0.75	23.58
	57.30	- 1.60	23.11	57.90	- 0.78	23.52	53.64	- 0.71	23.59
25	57.12	- 1.51	23.22	57.36	- 0.73	23.81	53.13	- 0.71	23.86
	57.15	- 1.53	23.23	57.31	- 0.75	23.72	53.27	- 0.71	23.84
	57.22	- 1.51	23.24	57.32	- 0.71	23.73	53.37	- 0.72	23.76
30	56.70	- 1.21	23.46	56.18	- 0.66	24.44	52.03	- 0.65	24.65
	56.66	- 1.22	23.62	56.19	- 0.69	24.44	52.01	- 0.54	24.66
	56.58	- 1.23	23.46	56.18	- 0.68	24.49	52.05	- 0.58	24.58

ตารางที่ 1.2 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.35 % และตามช่วงอุณหภูมิ ($\pm 1.5^{\circ}\text{ซ.}$)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	63.45	- 2.23	13.03	62.53	- 1.54	16.04	57.89	- 1.51	23.55
	63.54	- 2.42	13.01	62.54	- 1.68	16.08	57.90	- 1.52	23.57
	63.74	- 2.31	13.04	62.57	- 1.63	16.13	57.84	- 1.54	23.51
5	60.68	- 2.13	21.50	60.41	- 1.54	23.68	56.64	- 1.51	24.16
	60.52	- 2.15	21.46	60.42	- 1.64	23.59	56.54	- 1.54	24.19
	60.45	- 2.14	21.52	60.35	- 1.54	23.71	56.75	- 1.53	24.15
10	58.95	- 1.94	23.58	58.64	- 1.23	24.04	55.45	- 1.13	24.46
	58.14	- 1.89	23.65	58.83	- 1.56	23.97	55.61	- 1.21	24.42
	58.63	- 1.93	23.60	58.65	- 1.34	24.00	55.34	- 1.14	24.37
15	57.46	- 1.78	24.28	57.23	- 1.04	24.85	54.32	- 0.89	25.19
	57.75	- 1.81	24.30	57.34	- 1.04	24.77	54.35	- 0.88	25.15
	57.64	- 1.79	24.35	57.24	- 1.13	24.84	54.46	- 0.84	25.21
20	57.32	- 1.64	24.96	56.13	- 0.81	25.25	53.78	- 0.78	25.47
	57.46	- 1.69	25.02	56.31	- 0.84	25.19	53.35	- 0.75	25.56
	57.30	- 1.56	25.00	56.42	- 0.87	25.22	53.64	- 0.74	25.57
25	57.12	- 1.50	25.11	56.12	- 0.75	25.51	53.13	- 0.71	25.84
	57.15	- 1.53	25.12	56.13	- 0.76	25.42	53.27	- 0.72	25.82
	57.11	- 1.52	25.13	56.10	- 0.68	25.43	53.14	- 0.72	25.74
30	56.56	- 1.24	25.35	55.56	- 0.56	26.14	52.03	- 0.58	26.63
	56.66	- 1.25	25.51	55.89	- 0.68	26.14	52.01	- 0.54	26.64
	56.54	- 1.23	25.35	55.94	- 0.68	26.19	52.31	- 0.56	26.56

ตารางที่ 1.3 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.50 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	62.50	- 2.12	14.81	62.45	- 1.75	17.49	61.53	- 1.52	24.79
	62.53	- 2.13	14.79	62.43	- 1.86	17.53	61.53	- 1.53	24.81
	62.54	- 2.14	14.82	62.23	- 1.86	17.58	61.85	- 1.54	24.75
5	61.45	- 2.01	23.28	60.45	- 1.56	25.13	59.86	- 1.45	25.40
	61.53	- 2.04	23.24	60.53	- 1.64	25.04	59.46	- 1.42	25.43
	61.85	- 2.03	23.30	60.23	- 1.54	25.16	59.79	- 1.43	25.39
10	60.45	- 1.86	25.36	60.12	- 1.24	25.49	58.55	- 1.12	25.70
	60.53	- 1.86	25.43	60.13	- 1.25	25.42	58.89	- 1.14	25.66
	60.45	- 1.89	25.38	60.23	- 1.34	25.45	58.88	- 1.14	25.61
15	58.56	- 1.75	26.06	58.89	- 1.08	26.30	57.56	- 0.89	26.43
	58.55	- 1.68	26.08	58.56	- 1.16	26.22	57.56	- 0.84	26.39
	58.79	- 1.64	26.13	58.79	- 1.13	26.29	57.23	- 0.84	26.45
20	57.55	- 1.56	26.74	57.56	- 0.78	26.70	55.89	- 0.78	26.71
	57.86	- 1.51	26.80	57.46	- 0.84	26.64	55.57	- 0.75	26.80
	57.46	- 1.54	26.78	57.62	- 0.87	26.67	55.89	- 0.71	26.81
25	57.12	- 1.48	26.89	57.02	- 0.68	26.96	54.89	- 0.68	27.08
	57.01	- 1.47	26.90	56.56	- 0.75	26.87	54.88	- 0.64	27.06
	57.05	- 1.46	26.91	56.46	- 0.68	26.88	54.53	- 0.61	26.98
30	56.80	- 1.34	27.13	56.02	- 0.74	27.59	53.56	- 0.58	27.87
	56.45	- 1.23	27.29	56.03	- 0.64	27.59	53.45	- 0.54	27.88
	56.56	- 1.23	27.13	55.79	- 0.68	27.64	53.78	- 0.56	27.80

ตารางที่ 2 ตัวแปรควบคุมได้แก่ ความเร็วรอบใบกวน 100 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 30 เซนติเมตร และอัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 2.1 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.20 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	62.56	- 2.45	12.26	61.53	- 1.74	15.90	58.23	- 1.58	22.68
	62.53	- 2.43	12.24	61.55	- 1.75	15.94	57.89	- 1.54	22.70
	62.89	- 2.41	12.27	61.23	- 1.71	15.99	57.95	- 1.56	22.64
5	60.53	- 2.24	20.73	59.68	- 1.54	23.54	56.23	- 1.52	23.29
	60.53	- 2.21	20.69	59.62	- 1.53	23.45	56.65	- 1.57	23.32
	60.53	- 2.25	20.75	59.46	- 1.54	23.57	56.91	- 1.51	23.28
10	58.95	- 1.89	22.81	57.23	- 1.34	23.90	55.13	- 1.24	23.59
	58.56	- 1.94	22.88	57.13	- 1.35	23.83	55.31	- 1.23	23.55
	58.62	- 1.93	22.83	57.15	- 1.35	23.86	55.21	- 1.22	23.50
15	57.86	- 1.75	23.51	56.23	- 1.12	24.71	54.61	- 0.88	24.32
	57.53	- 1.84	23.53	56.85	- 1.12	24.63	54.52	- 0.89	24.28
	57.63	- 1.84	23.58	56.95	- 1.13	24.70	54.31	- 0.87	24.34
20	56.56	- 1.64	24.19	55.89	- 0.81	25.11	53.22	- 0.78	24.60
	56.45	- 1.56	24.25	55.56	- 0.84	25.05	53.42	- 0.78	24.69
	56.23	- 1.45	24.23	55.75	- 0.78	25.08	53.31	- 0.71	24.70
25	55.62	- 1.41	24.34	54.62	- 0.74	25.37	52.61	- 0.64	24.97
	55.86	- 1.39	24.35	54.53	- 0.73	25.28	52.31	- 0.61	24.95
	55.91	- 1.32	24.36	54.62	- 0.71	25.29	52.14	- 0.62	24.87
30	54.65	- 1.21	24.58	53.62	- 0.64	26.00	51.02	- 0.59	25.76
	54.53	- 1.22	24.74	53.46	- 0.64	26.00	51.34	- 0.54	25.77
	54.53	- 1.21	24.58	53.24	- 0.68	26.05	51.43	- 0.55	25.69

ตารางที่ 2.2 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.35 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	61.56	- 2.21	14.16	61.12	- 1.51	17.27	57.50	- 1.45	24.66
	61.53	- 2.11	14.14	61.02	- 1.68	17.31	57.65	- 1.46	24.68
	61.23	- 2.12	14.17	60.89	- 1.52	17.36	57.64	- 1.47	24.62
5	58.65	- 2.01	22.63	58.23	- 1.45	24.91	56.65	- 1.38	25.27
	58.66	- 2.04	22.59	58.56	- 1.42	24.82	56.34	- 1.34	25.30
	58.46	- 2.03	22.65	58.23	- 1.43	24.94	56.32	- 1.34	25.26
10	55.12	- 1.94	24.71	55.01	- 1.22	25.27	55.02	- 1.12	25.57
	55.16	- 1.89	24.78	55.06	- 1.24	25.20	55.07	- 1.11	25.53
	55.43	- 1.87	24.73	55.12	- 1.31	25.23	55.09	- 1.14	25.48
15	53.10	- 1.75	25.41	52.89	- 1.04	26.08	52.13	- 0.81	26.30
	53.42	- 1.74	25.43	52.56	- 1.05	26.00	52.13	- 0.83	26.26
	53.23	- 1.72	25.48	52.54	- 1.07	26.07	52.15	- 0.81	26.32
20	52.22	- 1.58	26.09	51.56	- 0.82	26.48	51.23	- 0.77	26.58
	52.12	- 1.57	26.15	51.32	- 0.83	26.42	52.53	- 0.76	26.67
	52.21	- 1.59	26.13	51.64	- 0.82	26.45	51.34	- 0.74	26.68
25	51.23	- 1.47	26.24	50.89	- 0.74	26.74	50.56	- 0.68	26.95
	51.13	- 1.49	26.25	50.68	- 0.71	26.65	50.45	- 0.64	26.93
	51.23	- 1.46	26.26	50.95	- 0.73	26.66	50.35	- 0.67	26.85
30	50.12	- 1.21	26.48	50.02	- 0.55	27.37	49.50	- 0.54	27.74
	50.31	- 1.22	26.64	50.12	- 0.54	27.37	49.56	- 0.51	27.75
	50.62	- 1.23	26.48	50.08	- 0.53	27.42	49.23	- 0.49	27.67

ตารางที่ 2.3 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.50 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	60.53	- 2.01	16.26	60.12	- 1.78	18.62	60.02	- 1.51	25.93
	60.53	- 2.01	16.24	60.02	- 1.94	18.66	59.89	- 1.54	25.95
	60.65	- 2.04	16.27	60.30	- 1.84	18.71	59.86	- 1.57	25.89
5	58.12	- 1.89	24.73	58.04	- 1.45	26.26	57.98	- 1.42	26.54
	58.56	- 1.97	24.69	58.06	- 1.45	26.17	57.56	- 1.41	26.57
	58.32	- 1.87	24.75	58.07	- 1.65	26.29	57.84	- 1.43	26.53
10	55.01	- 1.78	26.81	54.98	- 1.32	26.62	54.45	- 1.21	26.84
	55.03	- 1.76	26.88	54.86	- 1.34	26.55	54.32	- 1.21	26.80
	55.12	- 1.71	26.83	54.87	- 1.24	26.58	54.51	- 1.23	26.75
15	53.12	- 1.68	27.51	52.89	- 1.04	27.43	52.61	- 0.88	27.57
	53.16	- 1.67	27.53	52.84	- 1.02	27.35	52.32	- 0.87	27.53
	53.12	- 1.67	27.58	52.54	- 1.04	27.42	52.45	- 0.87	27.59
20	52.12	- 1.55	28.19	51.02	- 0.87	27.83	50.86	- 0.76	27.85
	52.13	- 1.54	28.25	51.06	- 0.75	27.77	50.95	- 0.69	27.94
	52.14	- 1.52	28.23	51.08	- 0.76	27.80	50.57	- 0.64	27.95
25	51.04	- 1.44	28.34	50.56	- 0.64	28.09	50.13	- 0.58	28.22
	51.04	- 1.42	28.35	50.64	- 0.59	28.00	50.24	- 0.54	28.20
	51.06	- 1.47	28.36	50.31	- 0.57	28.01	50.45	- 0.57	28.12
30	50.13	- 1.34	28.58	49.65	- 0.56	28.72	49.12	- 0.49	29.01
	50.14	- 1.31	28.74	49.68	- 0.56	28.72	49.10	- 0.47	29.02
	50.16	- 1.34	28.58	49.91	- 0.57	28.77	49.05	- 0.42	28.94

ตารางที่ 3 ตัวแปรควบคุมได้แก่ ความเร็วรอบใบกวน 150 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 30 เซนติเมตร และอัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.20 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	60.13	- 2.23	13.50	59.68	- 1.71	17.27	59.16	- 1.57	23.90
	60.12	- 2.23	13.48	59.56	- 1.72	17.31	59.06	- 1.54	23.92
	60.14	- 2.35	13.51	59.62	- 1.75	17.36	59.21	- 1.56	23.86
5	58.45	- 2.12	21.97	58.01	- 1.54	24.91	57.64	- 1.45	24.51
	58.61	- 2.11	21.93	58.06	- 1.56	24.82	57.45	- 1.48	24.54
	58.64	- 2.14	21.99	58.07	- 1.57	24.94	57.61	- 1.47	24.50
10	55.04	- 1.87	24.05	54.56	- 1.34	25.27	54.12	- 1.27	24.81
	55.06	- 1.88	24.12	54.62	- 1.37	25.20	54.13	- 1.27	24.77
	55.12	- 1.86	24.07	54.61	- 1.38	25.23	54.16	- 1.29	24.72
15	53.12	- 1.75	24.75	52.45	- 1.22	26.08	52.16	- 0.78	25.54
	53.24	- 1.76	24.77	52.61	- 1.23	26.00	52.13	- 0.79	25.50
	53.26	- 1.74	24.82	52.54	- 1.24	26.07	52.31	- 0.78	25.56
20	52.24	- 1.61	25.43	50.98	- 0.81	26.48	50.12	- 0.69	25.82
	52.14	- 1.67	25.49	50.97	- 0.82	26.42	50.16	- 0.61	25.91
	52.31	- 1.68	25.47	50.95	- 0.89	26.45	50.17	- 0.67	25.92
25	51.56	- 1.56	25.58	49.89	- 0.74	26.74	49.56	- 0.59	26.19
	51.46	- 1.57	25.59	49.87	- 0.75	26.65	49.65	- 0.57	26.17
	51.48	- 1.55	25.60	49.86	- 0.74	26.66	49.61	- 0.59	26.09
30	50.01	- 1.34	25.82	48.89	- 0.65	27.37	48.11	- 0.47	26.98
	50.03	- 1.36	25.98	48.95	- 0.67	27.37	48.12	- 0.49	26.99
	50.04	- 1.34	25.82	48.97	- 0.67	27.42	48.61	- 0.47	26.91

ตารางที่ 3.2 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.35 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	59.95	- 2.02	15.50	57.85	- 1.61	18.82	56.57	- 1.54	25.88
	59.46	- 2.04	15.48	57.86	- 1.67	18.86	56.56	- 1.46	25.90
	59.46	- 2.06	15.51	57.64	- 1.69	18.91	56.32	- 1.48	25.84
5	58.01	- 1.98	23.97	56.64	- 1.44	26.46	55.65	- 1.23	26.49
	58.12	- 1.89	23.93	56.54	- 1.46	26.37	55.94	- 1.24	26.52
	58.24	- 1.87	23.99	56.95	- 1.47	26.49	55.84	- 1.27	26.48
10	57.86	- 1.78	26.05	55.01	- 1.24	26.82	54.01	- 1.07	26.79
	57.86	- 1.75	26.12	55.16	- 1.28	26.75	54.03	- 1.08	26.75
	57.84	- 1.71	26.07	55.17	- 1.24	26.78	54.10	- 1.05	26.70
15	54.61	- 1.59	26.75	53.21	- 1.05	27.63	52.10	- 0.81	27.52
	54.61	- 1.57	26.77	53.61	- 1.04	27.55	52.04	- 0.84	27.48
	54.57	- 1.68	26.82	53.43	- 1.07	27.62	52.15	- 0.87	27.54
20	53.64	- 1.46	27.43	51.42	- 0.81	28.03	50.13	- 0.78	27.80
	53.62	- 1.47	27.49	51.46	- 0.87	27.97	50.42	- 0.76	27.89
	53.48	- 1.49	27.47	51.84	- 0.83	28.00	50.23	- 0.74	27.90
25	52.56	- 1.37	27.58	49.86	- 0.71	28.29	49.56	- 0.68	28.17
	52.95	- 1.38	27.59	49.75	- 0.71	28.20	49.61	- 0.61	28.15
	52.64	- 1.34	27.60	49.84	- 0.73	28.21	49.32	- 0.67	28.07
30	51.64	- 1.22	27.82	47.95	- 0.57	28.92	48.02	- 0.54	28.96
	51.53	- 1.28	27.98	47.86	- 0.58	28.92	48.05	- 0.51	28.97
	51.42	- 1.21	27.82	47.95	- 0.53	28.97	48.07	- 0.57	28.89

ตารางที่ 3.3 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.50 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	58.95	- 2.13	17.80	57.60	- 1.88	20.03	56.12	- 1.51	26.94
	58.64	- 2.14	17.78	57.45	- 1.89	20.07	56.23	- 1.54	26.96
	58.91	- 2.16	17.81	57.61	- 1.94	20.12	56.21	- 1.57	26.90
5	57.75	- 1.88	26.27	56.61	- 1.38	27.67	55.45	- 1.42	27.55
	57.64	- 1.87	26.23	56.33	- 1.49	27.58	55.43	- 1.41	27.58
	57.94	- 1.86	26.29	56.24	- 1.47	27.70	55.24	- 1.43	27.54
10	56.95	- 1.71	28.35	54.95	- 1.28	28.03	54.02	- 1.21	27.85
	56.94	- 1.69	28.42	54.86	- 1.27	27.96	54.16	- 1.21	27.81
	56.97	- 1.71	28.37	54.64	- 1.21	27.99	54.13	- 1.23	27.76
15	54.61	- 1.59	29.05	53.12	- 1.04	28.84	52.01	- 0.88	28.58
	54.61	- 1.57	29.07	53.42	- 1.02	28.76	52.23	- 0.87	28.54
	54.23	- 1.58	29.12	53.12	- 1.02	28.83	52.23	- 0.87	28.60
20	53.23	- 1.40	29.73	52.31	- 0.88	29.24	50.86	- 0.76	28.86
	53.61	- 1.47	29.79	52.42	- 0.75	29.18	50.45	- 0.69	28.95
	53.42	- 1.42	29.77	52.61	- 0.76	29.21	50.46	- 0.64	28.96
25	52.13	- 1.23	29.88	48.86	- 0.64	29.50	48.56	- 0.58	29.23
	52.16	- 1.27	29.89	48.61	- 0.59	29.41	48.95	- 0.54	29.21
	52.24	- 1.21	29.90	48.95	- 0.54	29.42	48.67	- 0.57	29.13
30	50.13	- 1.10	30.12	47.95	- 0.51	30.13	47.56	- 0.49	30.02
	50.14	- 1.11	30.28	47.61	- 0.52	30.13	47.61	- 0.47	30.03
	50.24	- 1.09	30.12	47.85	- 0.51	30.18	47.85	- 0.42	29.95

ตารางที่ 4 ตัวแปรควบคุมได้แก่ ความเร็วรอบใบกวน 50 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 20 เซนติเมตร และอัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.20 % และตามช่วงอุณหภูมิ ($\pm 1.5^{\circ}\text{ซ.}$)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	63.96	- 2.13	11.34	63.08	- 1.42	14.54	58.86	- 1.36	21.77
	63.95	- 2.12	11.32	63.03	- 1.40	14.58	58.76	- 1.35	21.79
	63.94	- 2.18	11.35	62.98	- 1.41	14.63	58.96	- 1.34	21.73
5	60.89	- 1.94	19.81	60.65	- 1.30	22.18	56.36	- 1.26	22.38
	60.88	- 1.93	19.77	60.77	- 1.31	22.09	56.58	- 1.27	22.41
	60.91	- 1.90	19.83	60.59	- 1.32	22.21	56.59	- 1.27	22.37
10	58.91	- 1.59	21.89	58.98	- 1.12	22.54	55.69	- 0.97	22.68
	58.86	- 1.58	21.96	59.03	- 1.01	22.47	55.80	- 1.01	22.64
	58.83	- 1.58	21.91	59.00	- 1.13	22.50	55.86	- 1.00	22.59
15	57.97	- 1.44	22.59	58.62	- 0.90	23.35	54.62	- 0.65	23.41
	57.95	- 1.46	22.61	58.72	- 0.79	23.27	54.66	- 0.65	23.37
	57.92	- 1.44	22.66	58.62	- 0.91	23.34	54.65	- 0.63	23.43
20	57.52	- 1.31	23.27	58.26	- 0.59	23.75	53.98	- 0.54	23.69
	57.55	- 1.34	23.33	58.22	- 0.59	23.69	53.84	- 0.51	23.78
	57.50	- 1.25	23.31	58.10	- 0.56	23.72	53.84	- 0.47	23.79
25	57.32	- 1.16	23.42	57.56	- 0.51	24.01	53.33	- 0.47	24.06
	57.35	- 1.18	23.43	57.51	- 0.53	23.92	53.47	- 0.47	24.04
	57.42	- 1.16	23.44	57.52	- 0.49	23.93	53.57	- 0.48	23.96
30	56.90	- 0.86	23.66	56.38	- 0.44	24.64	52.23	- 0.41	24.85
	56.86	- 0.87	23.82	56.39	- 0.47	24.64	52.21	- 0.30	24.86
	56.78	- 0.88	23.66	56.38	- 0.46	24.69	52.25	- 0.34	24.78

ตารางที่ 4.2 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.35 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	63.77	- 1.91	13.35	62.85	- 1.22	16.36	58.21	- 1.19	23.87
	63.86	- 2.10	13.33	62.86	- 1.36	16.40	58.22	- 1.20	23.89
	64.06	- 1.99	13.36	62.89	- 1.31	16.45	58.16	- 1.22	23.83
5	61.00	- 1.81	21.82	60.73	- 1.22	24.00	56.96	- 1.19	24.48
	60.84	- 1.83	21.78	60.74	- 1.32	23.91	56.86	- 1.22	24.51
	60.77	- 1.82	21.84	60.67	- 1.22	24.03	57.07	- 1.21	24.47
10	59.30	- 1.59	23.93	58.99	- 0.88	24.39	55.80	- 0.78	24.81
	58.49	- 1.54	24.00	59.18	- 1.21	24.32	55.96	- 0.86	24.77
	58.98	- 1.58	23.95	59.00	- 0.99	24.35	55.69	- 0.79	24.72
15	57.78	- 1.46	24.56	57.55	- 0.72	25.17	54.64	- 0.57	25.51
	58.07	- 1.49	24.58	57.66	- 0.72	25.09	54.67	- 0.56	25.47
	57.96	- 1.47	24.63	57.56	- 0.81	25.16	54.78	- 0.52	25.53
20	57.64	- 1.32	25.24	56.45	- 0.49	25.57	54.10	- 0.46	25.79
	57.78	- 1.37	25.30	56.63	- 0.52	25.51	53.67	- 0.43	25.88
	57.62	- 1.24	25.28	56.74	- 0.55	25.54	53.96	- 0.42	25.89
25	57.40	- 1.22	25.39	56.40	- 0.47	25.79	53.41	- 0.43	26.12
	57.43	- 1.25	25.40	56.41	- 0.48	25.70	53.55	- 0.44	26.10
	57.39	- 1.24	25.41	56.38	- 0.40	25.71	53.42	- 0.44	26.02
30	56.88	- 0.92	25.67	55.88	- 0.24	26.46	52.35	- 0.26	26.95
	56.98	- 0.93	25.83	56.21	- 0.36	26.46	52.33	- 0.22	26.96
	56.86	- 0.91	25.67	56.26	- 0.36	26.51	52.63	- 0.24	26.88

ตารางที่ 4.3 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.50 % และตามช่วงอุณหภูมิ ($\pm 1.5^{\circ}\text{ซ.}$)

เวลา (นาที)	75 $^{\circ}\text{ซ.}$			85 $^{\circ}\text{ซ.}$			95 $^{\circ}\text{ซ.}$		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	62.80	- 1.82	15.11	62.75	- 1.45	17.79	61.83	- 1.22	25.09
	62.83	- 1.83	15.09	62.73	- 1.56	17.83	61.83	- 1.23	25.11
	62.84	- 1.84	15.12	62.53	- 1.56	17.88	62.15	- 1.24	25.05
5	61.70	- 1.76	23.53	60.70	- 1.31	25.38	60.11	- 1.20	25.65
	61.78	- 1.79	23.49	60.78	- 1.39	25.29	59.71	- 1.17	25.68
	62.10	- 1.78	23.55	60.48	- 1.29	25.41	60.04	- 1.18	25.64
10	60.75	- 1.56	25.66	60.42	- 0.94	25.79	58.85	- 0.82	26.00
	60.83	- 1.56	25.73	60.43	- 0.95	25.72	59.19	- 0.84	25.96
	60.75	- 1.59	25.68	60.53	- 1.04	25.75	59.18	- 0.84	25.91
15	58.86	- 1.45	26.36	59.19	- 0.78	26.60	57.86	- 0.59	26.73
	58.85	- 1.38	26.38	58.86	- 0.86	26.52	57.86	- 0.54	26.69
	59.09	- 1.34	26.43	59.09	- 0.83	26.59	57.53	- 0.54	26.75
20	57.85	- 1.26	27.04	57.86	- 0.48	27.00	56.19	- 0.48	27.01
	58.16	- 1.21	27.10	57.76	- 0.54	26.94	55.87	- 0.45	27.10
	57.76	- 1.24	27.08	57.92	- 0.57	26.97	56.19	- 0.41	27.11
25	57.42	- 1.18	27.19	57.32	- 0.38	27.26	55.19	- 0.38	27.38
	57.31	- 1.17	27.20	56.86	- 0.45	27.17	55.18	- 0.34	27.36
	57.35	- 1.16	27.21	56.76	- 0.38	27.18	54.83	- 0.31	27.28
30	57.10	- 1.04	27.43	56.32	- 0.44	27.89	53.86	- 0.28	28.17
	56.75	- 0.93	27.59	56.33	- 0.34	27.89	53.75	- 0.24	28.18
	56.86	- 0.93	27.43	56.09	- 0.38	27.94	54.08	- 0.26	28.10

ตารางที่ 5 ตัวแปรควบคุมได้แก่ ความเร็วรอบใบกวน 100 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 20 เซนติเมตร และอัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 5.1 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.20 % และตามช่วงอุณหภูมิ ($\pm 1.5^{\circ}\text{ซ.}$)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	62.71	- 2.30	12.41	61.68	- 1.59	16.05	58.38	- 1.43	22.83
	62.68	- 2.28	12.39	61.70	- 1.60	16.09	58.04	- 1.39	22.85
	63.04	- 2.26	12.42	61.38	- 1.56	16.14	58.10	- 1.41	22.79
5	60.68	- 2.09	20.88	59.83	- 1.39	23.69	56.38	- 1.37	23.44
	60.68	- 2.06	20.84	59.77	- 1.38	23.60	56.80	- 1.42	23.47
	60.68	- 2.10	20.90	59.61	- 1.39	23.72	57.06	- 1.36	23.43
10	59.26	- 1.58	23.12	57.54	- 1.03	24.21	55.44	- 0.93	23.90
	58.87	- 1.63	23.19	57.44	- 1.04	24.14	55.62	- 0.92	23.86
	58.93	- 1.62	23.14	57.46	- 1.04	24.17	55.52	- 0.91	23.81
15	58.01	- 1.60	23.66	56.38	- 0.97	24.86	54.76	- 0.73	24.47
	57.68	- 1.69	23.68	57.00	- 0.97	24.78	54.67	- 0.74	24.43
	57.78	- 1.69	23.73	57.10	- 0.98	24.85	54.46	- 0.72	24.49
20	56.71	- 1.49	24.34	56.04	- 0.66	25.26	53.37	- 0.63	24.75
	56.60	- 1.41	24.40	55.71	- 0.69	25.20	53.57	- 0.63	24.84
	56.38	- 1.30	24.38	55.90	- 0.63	25.23	53.46	- 0.56	24.85
25	55.77	- 1.26	24.49	54.77	- 0.59	25.52	52.76	- 0.49	25.12
	56.01	- 1.24	24.50	54.68	- 0.58	25.43	52.46	- 0.46	25.10
	56.06	- 1.17	24.51	54.77	- 0.56	25.44	52.29	- 0.47	25.02
30	54.80	- 1.06	24.73	53.77	- 0.49	26.15	51.17	- 0.44	25.91
	54.68	- 1.07	24.89	53.61	- 0.49	26.15	51.49	- 0.39	25.92
	54.68	1.36	24.73	53.39	- 0.53	26.20	51.58	- 0.40	25.84

ตารางที่ 5.2 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.35 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	61.87	- 1.90	14.47	61.43	- 1.20	17.58	57.81	- 1.14	24.97
	61.84	- 1.80	14.45	61.33	- 1.37	17.62	57.96	- 1.15	24.99
	61.54	- 1.81	14.48	61.20	- 1.21	17.67	57.95	- 1.16	24.93
5	58.96	- 1.70	22.94	58.54	- 1.14	25.22	56.96	- 1.07	25.58
	58.97	- 1.73	22.90	58.87	- 1.11	25.13	56.65	- 1.03	25.61
	58.77	- 1.72	22.96	58.54	- 1.12	25.25	56.63	- 1.03	25.57
10	55.27	- 1.79	24.86	55.16	- 1.07	25.42	55.17	- 0.97	25.72
	55.31	- 1.74	24.93	55.21	- 1.09	25.35	55.22	- 0.96	25.68
	55.58	- 1.72	24.88	55.27	- 1.16	25.38	55.24	- 0.99	25.63
15	53.41	- 1.44	25.72	53.20	- 0.73	26.39	52.44	- 0.50	26.61
	53.73	- 1.43	25.74	52.87	- 0.74	26.31	52.44	- 0.52	26.57
	53.54	- 1.41	25.79	52.85	- 0.76	26.38	52.46	- 0.50	26.63
20	52.53	- 1.27	26.40	51.87	- 0.51	26.79	51.54	- 0.46	26.89
	52.43	- 1.26	26.46	51.63	- 0.52	26.73	52.84	- 0.45	26.98
	52.52	- 1.28	26.44	51.95	- 0.51	26.76	51.65	- 0.43	26.99
25	51.54	- 1.16	26.55	51.20	- 0.43	27.05	50.87	- 0.37	27.26
	51.44	- 1.18	26.56	50.99	- 0.40	26.96	50.76	- 0.33	27.24
	51.54	- 1.15	26.57	51.26	- 0.42	26.97	50.66	- 0.36	27.16
30	50.43	- 0.90	26.79	50.33	- 0.24	27.68	49.81	- 0.23	28.05
	50.62	- 0.91	26.95	50.43	- 0.23	27.68	49.87	- 0.20	28.06
	50.93	- 0.92	26.79	50.39	- 0.22	27.73	49.54	- 0.18	27.98

ตารางที่ 5.3 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.50 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	61.42	- 1.12	17.15	61.01	- 0.89	19.51	60.91	- 0.62	26.82
	61.42	- 1.12	17.13	60.91	- 1.05	19.55	60.78	- 0.65	26.84
	61.54	- 1.15	17.16	61.19	- 0.95	19.60	60.75	- 0.68	26.78
5	59.01	- 1.00	25.62	58.93	- 0.56	27.15	58.87	- 0.53	27.43
	59.45	- 1.08	25.58	58.95	- 0.56	27.06	58.45	- 0.52	27.46
	59.21	- 0.98	25.64	58.96	- 0.76	27.18	58.73	- 0.54	27.42
10	55.90	- 0.89	27.70	55.87	- 0.43	27.51	55.34	- 0.32	27.73
	55.92	- 0.87	27.77	55.75	- 0.45	27.44	55.21	- 0.32	27.69
	56.01	- 0.82	27.72	55.76	- 0.35	27.47	55.40	- 0.34	27.64
15	54.01	- 0.79	28.40	53.78	- 0.15	28.32	53.50	0.01	28.46
	54.05	- 0.78	28.42	53.73	- 0.13	28.24	53.21	0.02	28.42
	54.01	- 0.78	28.47	53.43	- 0.15	28.31	53.34	0.02	28.48
20	52.88	- 0.79	28.95	51.78	- 0.11	28.59	51.62	-	28.61
	52.89	- 0.78	29.01	51.82	0.01	28.53	51.71	0.07	28.70
	52.90	- 0.76	28.99	51.84	-	28.56	51.33	0.12	28.71
25	51.93	- 0.55	29.23	51.45	0.25	28.98	51.02	0.31	29.11
	51.93	- 0.53	29.24	51.53	0.30	28.89	51.13	0.35	29.09
	51.95	- 0.58	29.25	51.20	0.32	28.90	51.34	0.32	29.01
30	51.02	- 0.45	29.47	50.54	0.33	29.61	50.01	0.40	29.90
	51.03	- 0.42	29.63	50.57	0.33	29.61	49.99	0.42	29.91
	51.05	- 0.45	29.47	50.80	0.32	29.66	49.94	0.47	29.83

ตารางที่ 6 ตัวแปรควบคุมได้แก่ ความเร็วรอบใบกวน 150 รอบต่อนาที, ระดับใบกวน 20 เซนติเมตร และอัตราการไหลวน 100 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 6.1 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.20 % และตามช่วงอุณหภูมิ $\pm(1.5^{\circ}\text{ซ.})$

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	60.68	- 1.68	14.05	60.23	- 1.16	17.82	59.71	- 1.02	24.45
	60.67	- 1.68	14.03	60.11	- 1.17	17.86	59.61	- 0.99	24.47
	60.69	- 1.80	14.06	60.17	- 1.20	17.91	59.76	- 1.01	24.41
5	59.12	- 1.45	22.64	58.68	- 0.87	25.58	58.31	- 0.78	25.18
	59.28	- 1.44	22.60	58.73	- 0.89	25.49	58.12	- 0.81	25.21
	59.31	- 1.47	22.66	58.74	- 0.90	25.61	58.28	- 0.80	25.17
10	55.71	- 1.20	24.72	55.23	- 0.67	25.94	54.79	- 0.60	25.48
	55.73	- 1.21	24.79	55.29	- 0.70	25.87	54.80	- 0.60	25.44
	55.79	- 1.19	24.74	55.28	- 0.71	25.90	54.83	- 0.62	25.39
15	53.79	- 1.08	25.42	53.12	- 0.55	26.75	52.83	- 0.11	26.21
	53.91	- 1.09	25.44	53.28	- 0.56	26.67	52.80	- 0.12	26.17
	53.93	- 1.07	25.49	53.21	- 0.57	26.74	52.98	- 0.11	26.23
20	52.91	- 0.94	26.10	51.65	- 0.61	27.15	50.79	- 0.02	26.49
	52.81	- 1.00	26.16	51.64	- 0.62	27.09	50.83	0.06	26.58
	52.98	- 1.01	26.14	51.62	- 0.69	27.12	50.84	-	26.59
25	52.23	- 0.89	26.25	50.56	- 0.54	27.41	50.23	0.08	26.86
	52.13	- 0.90	26.26	50.54	- 0.55	27.32	50.32	0.10	26.84
	52.15	- 0.88	26.27	50.53	- 0.54	27.33	50.28	0.08	26.76
30	50.68	- 0.67	26.49	49.56	- 0.45	28.04	48.78	0.20	27.65
	50.70	- 0.69	26.65	49.62	- 0.47	28.04	48.79	0.18	27.66
	50.71	- 0.67	26.49	49.64	- 0.47	28.09	49.28	0.20	27.58

ตารางที่ 6.2 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.35 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	60.16	- 1.81	15.71	58.06	- 1.40	19.03	56.78	- 1.33	26.09
	59.67	- 1.83	15.69	58.07	- 1.46	19.07	56.77	- 1.25	26.11
	59.67	- 1.85	15.72	57.85	- 1.48	19.12	56.53	- 1.27	26.05
5	58.36	- 1.63	24.32	56.99	- 1.09	26.81	56.00	- 0.88	26.84
	58.47	- 1.54	24.28	56.89	- 1.11	26.72	56.29	- 0.89	26.87
	58.59	- 1.52	24.34	57.30	- 1.12	26.84	56.19	- 0.92	26.83
10	58.07	- 1.57	26.26	55.22	- 1.03	27.03	54.22	- 0.86	27.00
	58.07	- 1.54	26.33	55.37	- 1.07	26.96	54.24	- 0.87	26.96
	58.05	- 1.50	26.28	55.38	- 1.03	26.99	54.31	- 0.84	26.91
15	54.82	- 1.38	26.96	53.42	- 0.84	27.84	52.31	- 0.60	27.73
	54.82	- 1.36	26.98	53.82	- 0.83	27.76	52.25	- 0.63	27.69
	54.78	- 1.47	27.03	53.64	- 0.86	27.83	52.36	- 0.66	27.75
20	53.85	- 1.25	27.64	51.63	- 0.60	28.24	50.34	- 0.57	28.01
	53.83	- 1.26	27.70	51.67	- 0.66	28.18	50.63	- 0.55	28.10
	53.69	- 1.28	27.68	52.05	- 0.62	28.21	50.44	- 0.53	28.11
25	52.77	- 1.16	27.79	50.07	- 0.50	28.50	49.77	- 0.47	28.38
	53.16	- 1.17	27.80	49.96	- 0.50	28.41	49.82	- 0.40	28.36
	52.85	- 1.13	27.81	50.05	- 0.52	28.42	49.53	- 0.46	28.28
30	51.85	- 1.01	28.03	48.16	- 0.36	29.13	48.23	- 0.33	29.17
	51.74	- 1.07	28.19	48.07	- 0.37	29.13	48.26	- 0.30	29.18
	51.63	- 1.00	28.03	48.16	- 0.32	29.18	48.28	- 0.36	29.10

ตารางที่ 6.3 ค่าสีของน้ำผักเชียงดาแห้ง อัตราส่วน 0.50 % และตามช่วงอุณหภูมิ (± 1.5 °ซ.)

เวลา (นาที)	75 °ซ.			85 °ซ.			95 °ซ.		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
0	59.27	- 1.81	18.12	57.92	- 1.56	20.35	56.44	- 1.19	27.26
	58.96	- 1.82	18.10	57.77	- 1.57	20.39	56.55	- 1.22	27.28
	59.23	- 1.84	18.13	57.93	- 1.62	20.44	56.53	- 1.25	27.22
5	58.07	- 1.56	26.59	56.93	- 1.06	27.99	55.77	- 1.10	27.87
	57.96	- 1.55	26.55	56.65	- 1.17	27.90	55.75	- 1.09	27.90
	58.26	- 1.54	26.61	56.56	- 1.15	28.02	55.56	- 1.11	27.86
10	57.27	- 1.39	28.67	55.27	- 0.96	28.35	54.34	- 0.89	28.17
	57.26	- 1.37	28.74	55.18	- 0.95	28.28	54.48	- 0.89	28.13
	57.29	- 1.39	28.69	54.96	- 0.89	28.31	54.45	- 0.91	28.08
15	54.93	- 1.27	29.37	53.44	- 0.72	29.16	52.33	- 0.56	28.90
	54.93	- 1.25	29.39	53.74	- 0.70	29.08	52.55	- 0.55	28.86
	54.55	- 1.26	29.44	53.44	- 0.70	29.15	52.55	- 0.55	28.92
20	53.55	- 1.08	30.05	52.63	- 0.56	29.56	51.18	- 0.44	29.18
	53.93	- 1.15	30.11	52.74	- 0.43	29.50	50.77	- 0.37	29.27
	53.74	- 1.10	30.09	52.93	- 0.44	29.53	50.78	- 0.32	29.28
25	52.45	- 0.91	30.20	49.18	- 0.32	29.82	48.88	- 0.26	29.55
	52.48	- 0.95	30.21	48.93	- 0.27	29.73	49.27	- 0.22	29.53
	52.56	- 0.89	30.22	49.27	- 0.22	29.74	48.99	- 0.25	29.45
30	50.45	- 0.78	30.44	48.27	- 0.19	30.45	47.88	- 0.17	30.34
	50.46	- 0.79	30.60	47.93	- 0.20	30.45	47.93	- 0.15	30.35
	50.56	- 0.77	30.44	48.17	- 0.19	30.50	48.17	- 0.10	30.27