



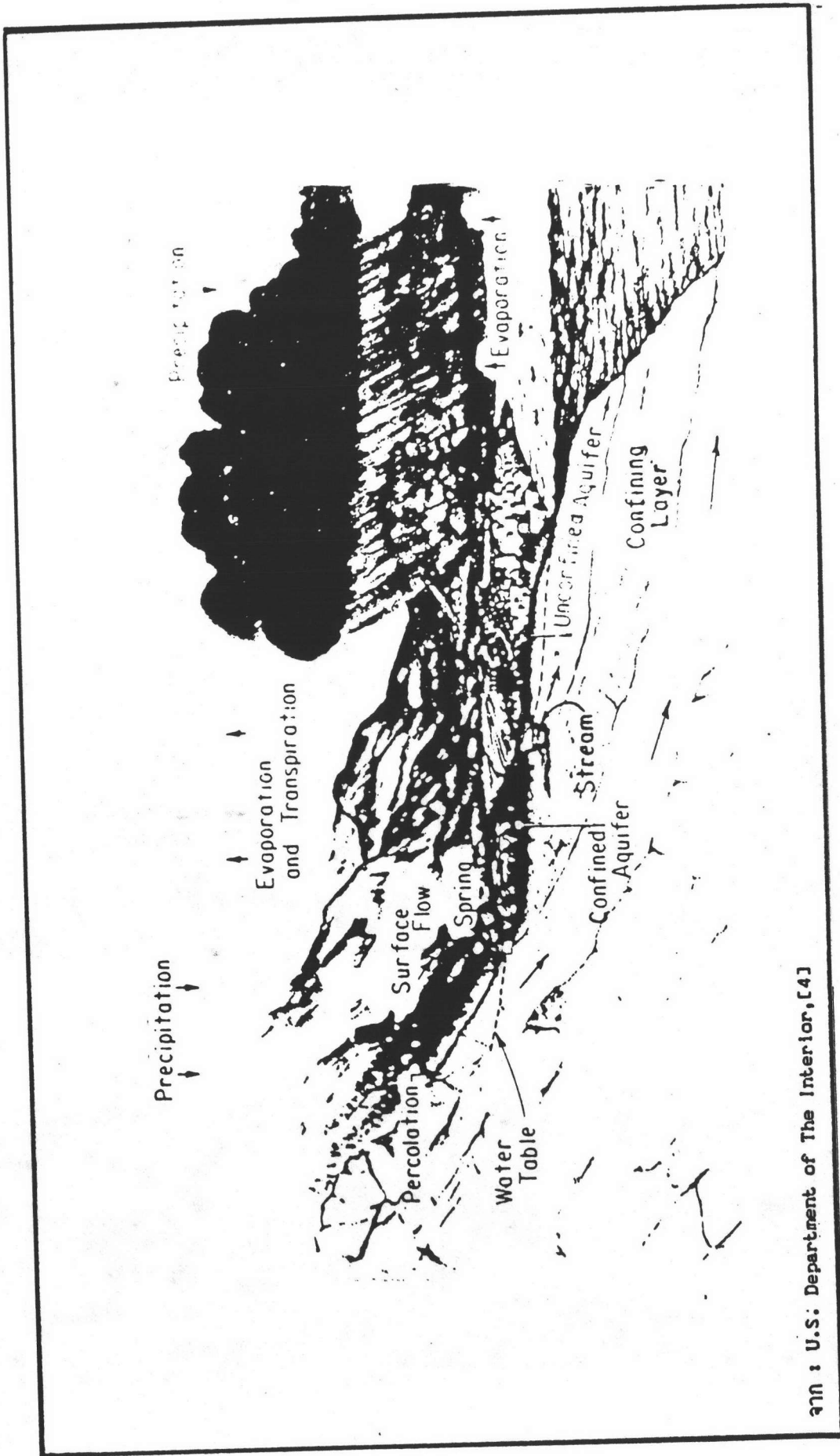
บทที่ 3

หลักวิชาการ และ ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึง วิชาการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีของน้ำใต้ดิน (Groundwater Theory) หลักการ ทฤษฎีของเครื่องสูบน้ำ (Principle and Theory of Centrifugal Pump) และ ทฤษฎีการใช้น้ำของพืช (Consumptive Use)

3.1 ทฤษฎีของน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินเป็นน้ำส่วนหนึ่ง ซึ่งประกอบอยู่ใน วัฏจักรการหมุนเวียนของน้ำบนผิวโลก (Hydrologic Cycle) ซึ่งประกอบด้วย น้ำฝน น้ำผิวดิน น้ำในอ่างเก็บน้ำ ทะเล มหาสมุทร และไอน้ำในอากาศที่เกิดจากการระเหยของน้ำบนพื้นผิวโลก วัฏจักรดังกล่าวจะเกิดการหมุนเวียนตลอดเวลา โดยมีดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ ในขบวนการดังกล่าวจะมีการเคลื่อนที่ การเปลี่ยนแปลงสถานะ และ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของน้ำ จากที่แห่งหนึ่งไปยังอีกแห่งดังแสดงในรูปที่ (3-1) ซึ่งมีขบวนการดังนี้ ไอน้ำในบรรยากาศ จะเกิดการควบแน่น เป็นผลึกของน้ำแข็งเล็กๆ หรือเป็นหยดน้ำเล็กๆ แล้วร่วงหล่นลงสู่พื้นโลก โดยแรงโน้มถ่วงของโลก ในรูปของน้ำฝน หรือหิมะ ส่วนหนึ่งของน้ำฝนที่ตกลงสู่พื้นโลก จะระเหยกลับสู่บรรยากาศ (Evaporation) ที่เหลือก็จะมีส่วนหนึ่งไหลไปตามพื้นผิวของโลก (Surface Runoff) จนกระทั่งมารวมกันเป็น ลำธาร แม่น้ำ และไหลลงสู่ทะเล และมหาสมุทร และอีกส่วนหนึ่งก็จะไหลซึมลงสู่ใต้ผิวดิน (Subsurface Runoff) ลึกลงไป ซึ่งน้ำในส่วนนี้จะเป็ประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืช โดยพืชจะนำน้ำในส่วนนี้ไปใช้ในการปรุงอาหาร และการสร้างเนื้อเยื่อของต้นพืช แล้วคายน้ำออกทางใบ (Transpiration) ส่วนที่เหลือก็จะซึมผ่านชั้นดินที่อยู่ลึกลงไป แล้วไปรวมตัวกัน โดยแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เมื่อไม่สามารถซึมผ่านต่อไปได้อีก ซึ่งมักเรียกน้ำในส่วนนี้ว่า น้ำใต้ดิน (Groundwater) น้ำใต้ดินในธรรมชาติจะกลับคืนสู่วัฏจักรโดยการซึมออกสู่แม่น้ำ หรือ ลำธาร หรือ ในลักษณะของการเกิดน้ำพุ แล้วหลังจากนั้นก็ระเหยกลับสู่บรรยากาศอีก ปริมาณน้ำในวัฏจักรนี้มีไม่แน่นอนแล้วแต่สภาพแวดล้อมตามธรรมชาติของแต่ละท้องถิ่น



จาก : U.S. Department of The Interior, [4]

รูปที่ (3-1) วงจรการของน้ำ

3.1.1 ธรณีวิทยาของน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินเกิดจากการที่น้ำบนพื้นผิวโลกซึมซับจากพื้นผิวลงสู่ชั้นดินเบื้องล่าง โดยการกระทำของแรงโน้มถ่วงโลก (Gravity) ซึ่งน้ำในส่วนนี้จะถูกกักเก็บสะสมอยู่ในช่องว่าง (Pores) ของเม็ดดิน หรือ เม็ดหิน ปริมาณช่องว่างที่สามารถเก็บกักน้ำได้ที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของมวลดินใด ๆ สามารถที่จะประเมินได้โดยอาศัยค่าความพรุนของมวลดิน (Porosity) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง ช่องว่างภายในมวลของเม็ดดิน กับ ปริมาตรรวมของมวลดิน น้ำในส่วนนี้ไม่สามารถซึมผ่านต่อไปได้เมื่อมีชั้นดินกั้นน้ำกั้นอยู่ ระดับน้ำใต้ดินจะสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่ผิวดินมีปริมาณมาก ชั้นดินที่อยู่ลึกจากระดับน้ำนี้ลงไปจะอยู่ในสภาวะที่อิ่มตัว (Saturated) ซึ่งจะมีน้ำบรรจุอยู่เต็มช่องว่างภายในเม็ดดิน ความลึกของระดับน้ำใต้ดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ขึ้นอยู่กับปริมาณที่กักเก็บ และ ส่วนที่ไหลมาเพิ่ม (Recharge)

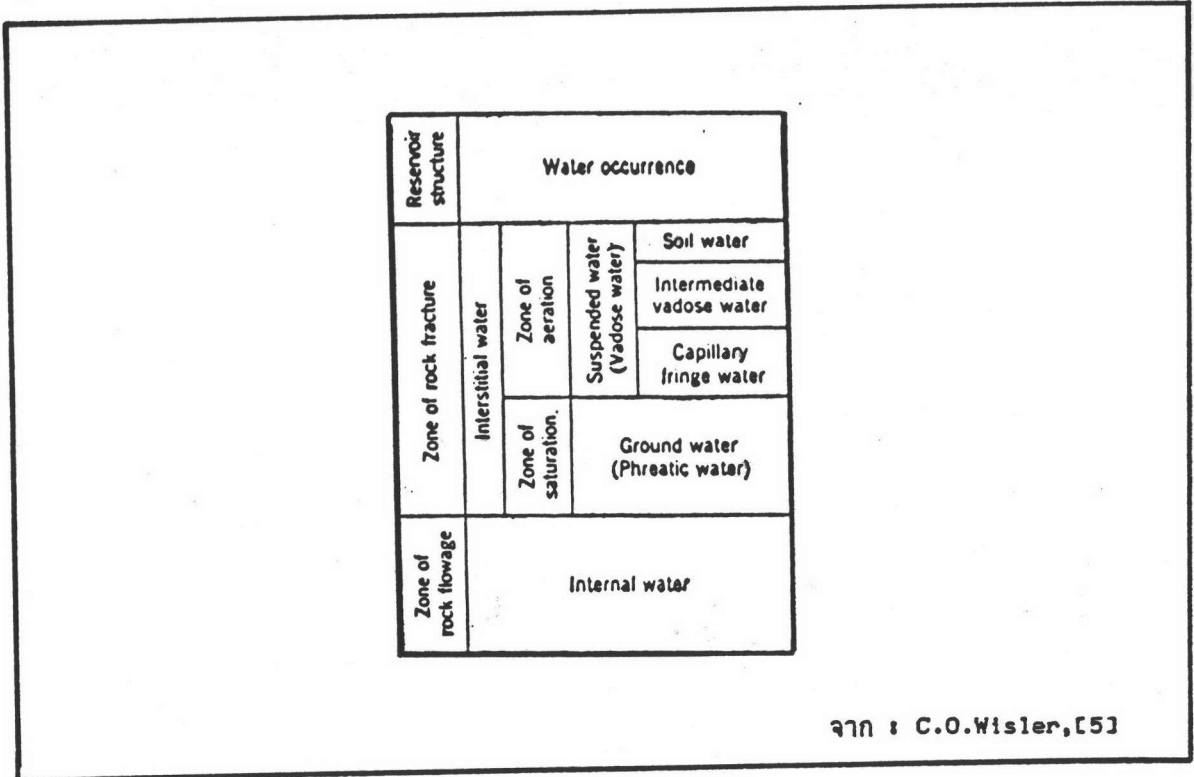
ชั้นหิน และชั้นดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินลงไป จะเป็นส่วนที่เก็บกักน้ำที่ไหลซึมจากพื้นผิวดินลงไป ซึ่งลักษณะในการกักเก็บ และ ส่วนประกอบทางธรณีวิทยา ได้แสดงในรูปที่ (3-3)

ชั้นดินที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บ และ การไหลของน้ำใต้ดิน แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 4 ประเภทด้วยกันคือ

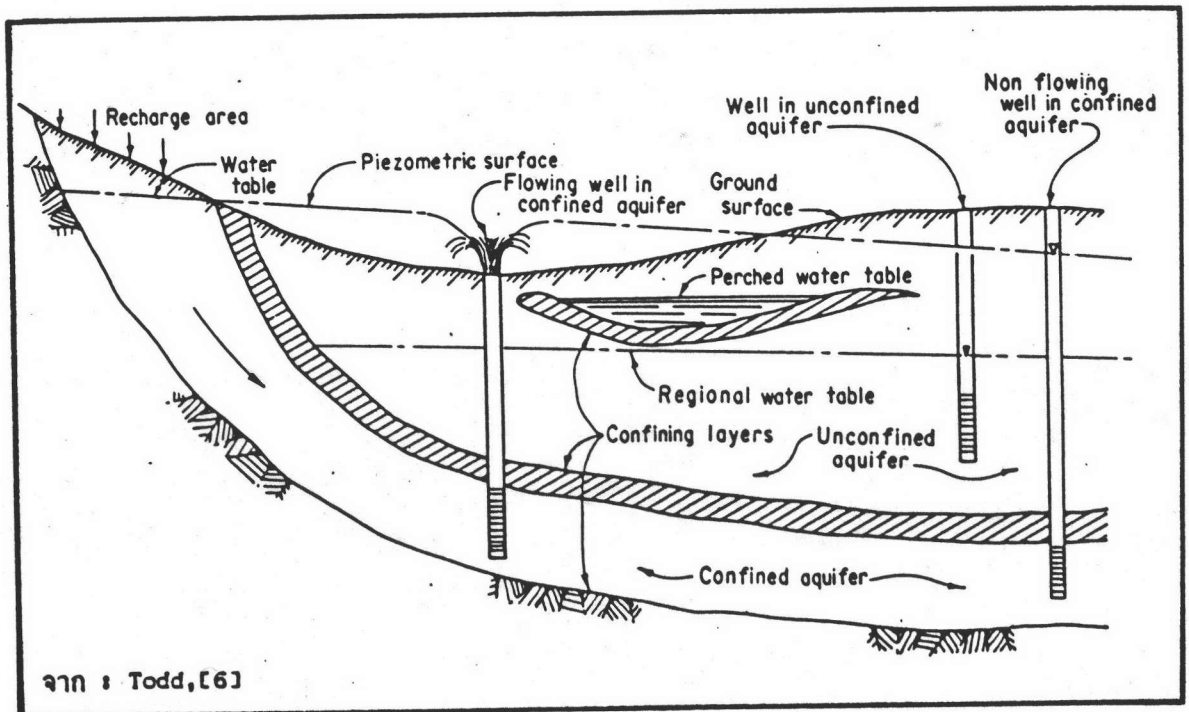
ก) Aquifer เป็นชั้นดิน หรือ หิน ที่สามารถกักเก็บน้ำในปริมาณที่มาก และ สามารถยอมให้น้ำซึมผ่านได้สะดวก ชั้นดินประเภทนี้ได้แก่ กรวด ทรายหยาบ และหินโปร่งเป็นต้น (Porous Rocks) โดยทั่วไปชั้นดินอุ้มน้ำ (Aquifer) จะมีความพรุนสูง มีขนาดของเม็ด (Particle size) ค่อนข้างใหญ่ และมีค่าความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability, K) ค่อนข้างสูง

ข) Aquiclude เป็นชั้นดิน หรือ หิน ที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัว (Saturated) ถึงแม้ว่าจะมีค่าความพรุนสูง แต่ช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดเล็กมาก น้ำไม่สามารถซึมผ่านช่องว่างเหล่านี้ได้สะดวก เนื่องจากผลของแรงตึงผิวมีสูงมาก การเจาะบ่อบาดาลในชั้นนี้ จะไม่สามารถนำน้ำขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้ ชั้นดินประเภทนี้ได้แก่ชั้นดินเหนียว เป็นต้น

ค) Aquifuge เป็นชั้นดินที่มีความหนาแน่นสูง จัดอยู่ในประเภท Consolidated Deposit มีช่องว่างภายในมวลเพื่อเก็บกักน้อย ความต่อเนื่องระหว่างช่องว่างภายใน ไม่ต่อเนื่องกันโดยตลอด โดยปกติจะหมายถึงชั้นหินแข็ง ที่ยังไม่มีการผุพัง เนื่องจากการทำงานของธรรมชาติ (Unweathered Rocks) ได้แก่ Solid Igneous Rocks และ Solid Metamorphic Rocks เป็นต้น



รูปที่ (3-2) การแบ่งชั้นอุทกธรณีวิทยาของพื้นผิวโลก



รูปที่ (3-3) ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินอุ้มน้ำ

ง) Aquitard เป็นชั้นดินที่อยู่ในสภาพอิ่มตัว แต่เป็นมวลดินที่มีค่า ความพรุนค่อนข้างต่ำ ทำให้น้ำไหลซึมผ่านมวลดินได้ยาก ชั้นดินประเภทนี้ได้แก่ ชั้นดินที่มีส่วนประกอบของ กรวด ทราย และดินเหนียว ปนอยู่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ช่องว่างภายในของมวลมีน้อย คุณสมบัติทางกายภาพในการกักเก็บต่ำมาก

3.1.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินอุ้มน้ำ

ลักษณะทางธรณีวิทยาที่สำคัญของชั้นดินอุ้มน้ำมีอยู่ 3 ลักษณะด้วยกันคือ

1) ชั้นดินอุ้มน้ำอิสระ (Unconfined Aquifer) เป็นลักษณะของชั้นดินอุ้มน้ำที่มีระดับผิวน้ำอิสระซึ่งอยู่ตอนบนสุดของขอบเขตของชั้นดินที่อิ่มตัว (Water Table) มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ไม่ได้อยู่ภายใต้ความกดดันใดๆ ชั้นดินอุ้มน้ำนี้จะวางตัวอยู่บนชั้นดินกั้นน้ำ (Confining Layer) การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในชั้นดินอุ้มน้ำแบบนี้ (เมื่อยังไม่มีการสูบน้ำจากบ่อ) จะเป็นตัวบ่งถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่ชั้นดินกักเก็บไว้ การไหลของน้ำใต้ดินของชั้นดินอุ้มน้ำอิสระ จะไหลไปด้วยแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลกไปตามแนวเอียงของระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินกั้นน้ำที่ชั้นดินอุ้มน้ำวางตัวอยู่ นอกจากนี้ยังมีกรณีที่พบซึ่งแตกต่างไปจากเดิมคือ ในกรณีที่มีชั้นดินกั้นน้ำแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นดินอุ้มน้ำ โดยที่ชั้นดินกั้นน้ำดังกล่าวอยู่เหนือระดับผิวน้ำอิสระ (Free Water Surface) ในชั้นดินอุ้มน้ำอิสระ บริเวณดังกล่าวจะมีอาณาเขตไม่กว้างขวางมากนัก เมื่อเทียบกับอาณาบริเวณของชั้นดินอุ้มน้ำทั้งหมด การเจาะหลุมสำรวจในบริเวณดังกล่าวจะพบว่า ระดับน้ำภายในบ่อจะสูงกว่าระดับน้ำโดยทั่วไปภายในบริเวณพื้นที่สำรวจ ระดับน้ำใต้ดินที่พบในลักษณะนี้เรียกว่า ระดับน้ำใต้ดินแปลกปลอม (Perched Water Table) ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์อันใดที่เกี่ยวกับ ระดับน้ำใต้ดินอิสระ และ ปริมาณน้ำในชั้นดินอุ้มน้ำอิสระที่อยู่ต่ำลงไปแต่อย่างใด

2) ชั้นดินอุ้มน้ำภายใต้ความกดดัน (Confined Aquifer) หมายถึงชั้นดินอุ้มน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นดินกั้นน้ำ (Unconfined Aquifer) ซึ่งอยู่ทั้งด้านบน และ ด้านล่าง น้ำที่แทรกตัวอยู่ในชั้นดินดังกล่าว จะอยู่ภายใต้ความกดดันอันหนึ่งที่สูงกว่าความดันบรรยากาศ ลักษณะการไหลของน้ำใต้ดินแบบนี้จะเหมือนกับการไหลภายในระบบปิด (Closed Conduit) การเจาะบ่อบาดาลจนลงไปถึงชั้นดินอุ้มน้ำแบบนี้ โดยทั่วไปจะพบว่าระดับน้ำภายในบ่อจะอยู่สูงกว่า ระดับของชั้นดินอุ้มน้ำ และ ในบางครั้งจะพบปรากฏการณ์ของ น้ำซึม หรือ น้ำชับ และ ในกรณีที่ความดันสูงมากก็อาจจะเกิดเป็น

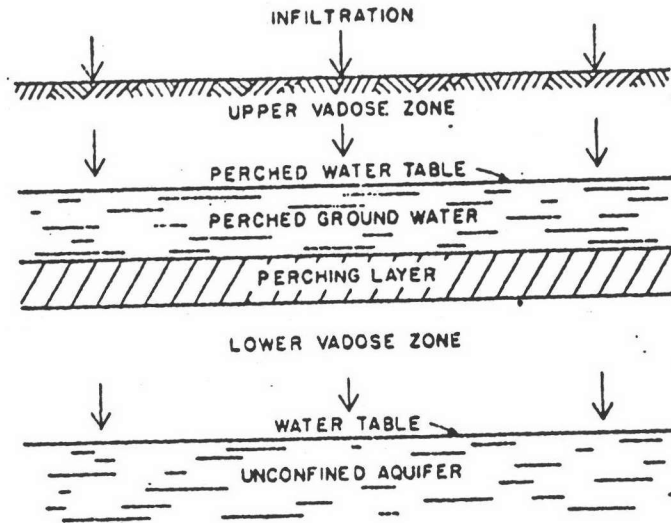
น้ำพุ (Spring) ดังแสดงในรูปที่ (3-3) สภาพของชั้นดินอุ้มน้ำแบบนี้ อาจแปรสภาพไปเป็นชั้นดินอุ้มน้ำอิสระได้ เมื่อปริมาณน้ำที่กักเก็บภายในชั้นดินอุ้มน้ำลดลง จนทำให้เกิดผิวน้ำอิสระได้ชั้นดินกับน้ำที่อยู่ตอนบน

(3) ชั้นดินอุ้มน้ำแบบกึ่งอิสระ (Semiconfined Aquifer or Leaky Aquifer) จะเกิดขึ้นในกรณีที่ชั้นดินอุ้มน้ำวางตัวอยู่ต่ำกว่าชั้นดินกึ่งกั้นน้ำ (Semi Impervious Layer or Aquitard) ดังในรูปที่ (3-4) โดยที่ระดับน้ำใต้ดิน (Water Table) วางตัวอยู่เหนือระดับของชั้นดินกึ่งกั้นน้ำ หรือ อาจจะอยู่ภายในชั้นดินกึ่งกั้นน้ำก็ได้ การสูบน้ำจากบ่อบาดาลในชั้นดินอุ้มน้ำแบบนี้ จะทำให้น้ำที่อยู่ตอนบนค่อยๆซึมผ่านชั้นดินกึ่งกั้นน้ำลงมา ในขณะที่เดียวกันความแตกต่างระหว่างชั้นดินอุ้มน้ำแบบกึ่งอิสระ กับชั้นดินอุ้มน้ำอิสระ จะอยู่ที่ความดันของน้ำในชั้นดินอุ้มน้ำอิสระ จะมีค่าเท่ากับ Hydrostatic Pore Water Pressure ณ ระดับนั้น บ่อบาดาลที่เจาะลงในชั้นดินอุ้มน้ำแบบนี้ ระดับน้ำในบ่อจะไม่สูงเกินกว่าระดับของผิวน้ำใต้ดินอิสระ ที่มีอยู่ ณ จุดนั้น โดยปกติชั้นดินที่มีการเก็บกักน้ำที่พบมาก และ มีการนำมาใช้ประโยชน์ จะมีลักษณะเป็นชั้นดินอุ้มน้ำแบบกึ่งอิสระ (Leaky Aquifer) เป็นส่วนใหญ่

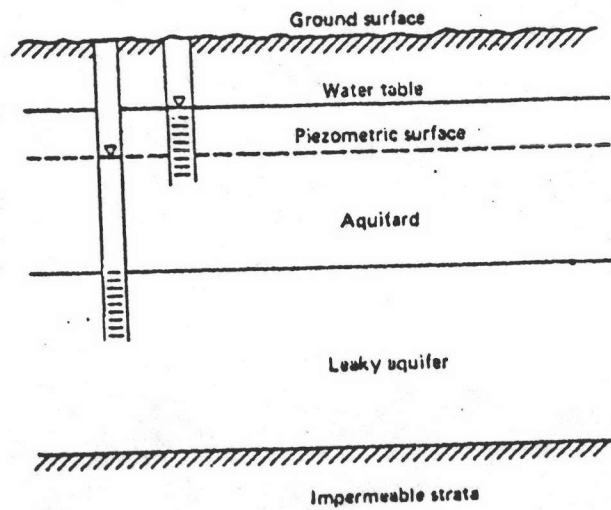
3.1.3 คุณสมบัติและตัวกำหนดที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณน้ำของชั้นดินอุ้มน้ำ

คุณสมบัติ และตัวกำหนดที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณน้ำของชั้นดินอุ้มน้ำ ที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ มีดังต่อไปนี้

1) ศักยภาพของชั้นดินอุ้มน้ำ (Potential of Aquifer) ในการที่จะให้น้ำแก่บ่อบาดาล ศักยภาพดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นดินอุ้มน้ำคือ ความสามารถในการกักเก็บ (Storage Coefficient of Aquifer) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของมวลดิน หรือ หิน ที่จะเก็บกักน้ำไว้ในมวลดิน มวลดินที่มีช่องว่างภายในมาก จะสามารถกักเก็บน้ำได้มาก คุณสมบัติดังกล่าวสามารถวัดได้ด้วยค่าความพรุน (Porosity) ของชั้นดินอุ้มน้ำ ในชั้นดินบางชนิดพบว่ามีความสามารถในการกักเก็บสูง แต่ไม่สามารถให้น้ำให้แก่บ่อบาดาลได้ เพราะว่าศักยภาพของชั้นดินอุ้มน้ำ ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นดินอุ้มน้ำอีกอันหนึ่งคือ ความสามารถในการส่งถ่าย (Transmissibility of Aquifer) ซึ่งคุณสมบัติในการส่งถ่ายสามารถกำหนดได้โดย ความสามารถในการซึมผ่านของชั้นดินอุ้มน้ำ (Permeability) คุณสมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาด และ รูปร่างของเม็ดดินในชั้นดินอุ้มน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีการกระจายขนาดของเม็ดดินค่อนข้างเลว คุณสมบัติดังกล่าว



Perched groundwater due to infiltration into soil with restricting layer.



Sketch of a leaky, or semiconfined, aquifer.

จาก : Todd, [6]

รูปที่ (3-4) ลักษณะของชั้นดินอุ้มน้ำแบบกึ่งอิสระ

สามารถประเมินได้จาก สัมประสิทธิ์ในการซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity หรือ Coefficient of Permeability) สำหรับตัวกำหนดที่มีผลต่อการให้น้ำของชั้นดินแก้บ่อบาดาลก็คือ ความหนาของชั้นดินอุ้มน้ำ (Aquifer Thickness) ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดในการซึมผ่านของน้ำใต้ดินมีมากขึ้น

2) การมีปริมาณน้ำที่จะมาทดแทนให้แก่ชั้นดินอุ้มน้ำ (Availability of Recharge Water) เป็นปริมาณน้ำที่ได้จากแหล่งอื่น ซึ่งไหลเข้ามาทดแทนส่วนที่หายไป ปริมาณน้ำส่วนนี้ส่วนใหญ่จะได้มาจากแหล่งในธรรมชาติที่สำคัญได้แก่ น้ำฝน ลำธาร แม่น้ำ ลำคลอง และอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น

3) การติดต่อเชื่อมโยงในแง่ของชลศาสตร์ (Hydraulic Connection) หมายถึง ความต่อเนื่องของชั้นดินอุ้มน้ำ ที่สามารถนำน้ำจากแหล่งน้ำที่สามารถให้ปริมาณน้ำมาทดแทนแก่ชั้นดินอุ้มน้ำ ชั้นดินอุ้มน้ำที่ต่อเนื่องจากแหล่งทดแทนไปยังชั้นดินอุ้มน้ำหลัก จะทำหน้าที่คล้ายท่อส่งน้ำ เป็นตัวกลางคอยเชื่อมโยงการไหลของน้ำใต้ดินจากแหล่งน้ำอื่น เข้ามายังบ่อน้ำใต้ดินที่มีการสูบน้ำ

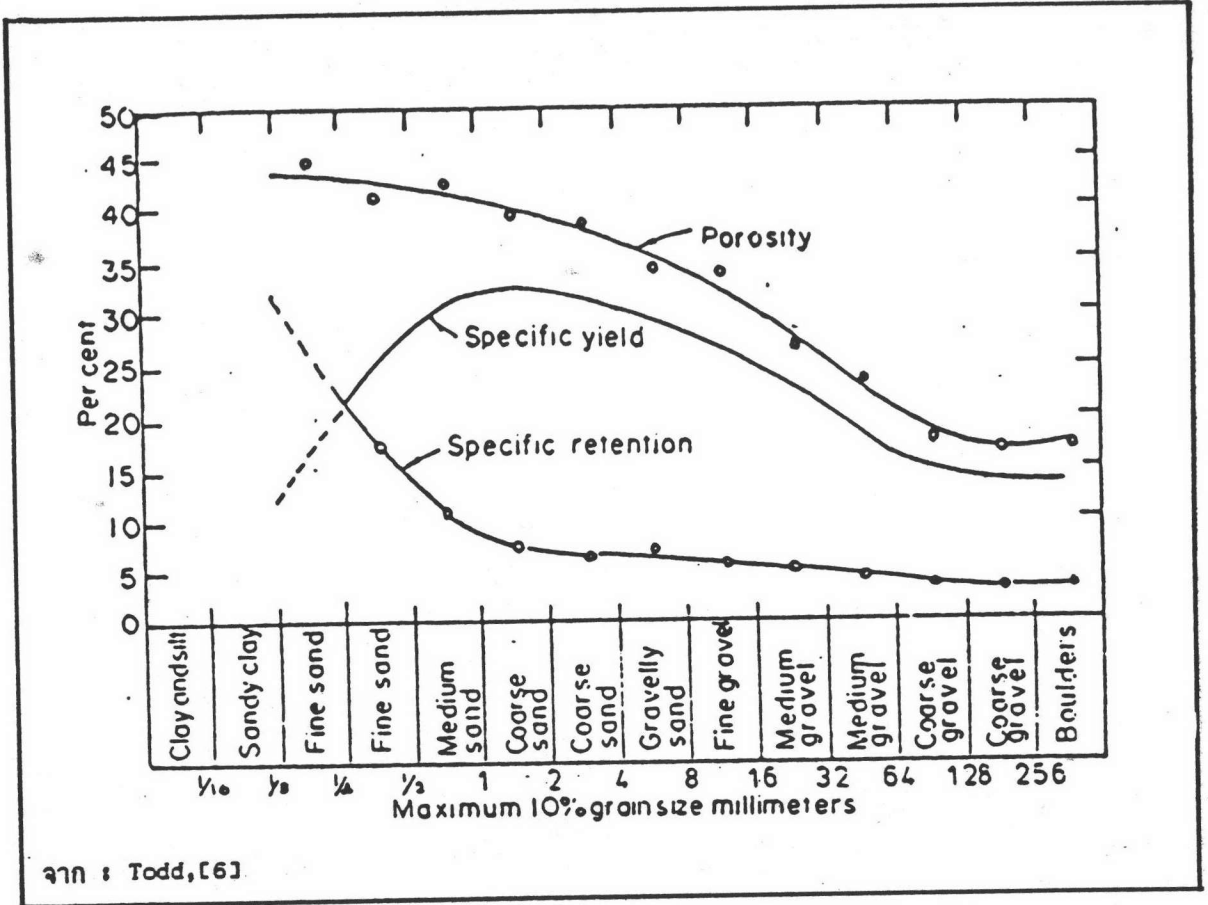
(4) ขอบข่ายของชั้นดินอุ้มน้ำ (Barrier Boundary) หมายถึงอาณาบริเวณ ขอบเขต และขนาดของชั้นดินอุ้มน้ำที่สามารถรองรับ และเก็บกักน้ำใต้ดินเอาไว้ เมื่อมีปริมาณทดแทนจากภายนอกเข้ามาทดแทน เมื่อถึงช่วงฤดูน้ำหลาก หรือในช่วงฤดูฝน

3.1.3 อัตราการให้น้ำจำเพาะ (Specific Yield)

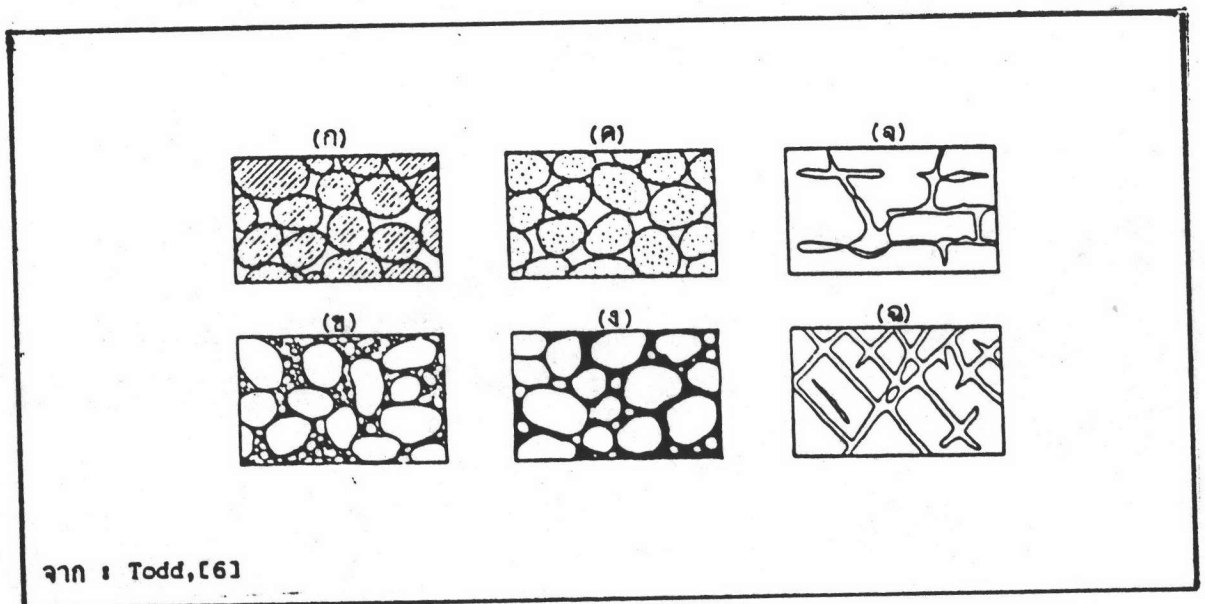
การสูบน้ำใต้ดินจากแหล่งกักเก็บจะไม่สามารถสูบน้ำขึ้นมาใช้ได้หมด จะมีน้ำบางส่วนที่เหลือติดค้างอยู่ในช่องว่างของเม็ดดิน เพราะอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลก และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเม็ดดินของชั้นดินอุ้มน้ำ คุณสมบัติของชั้นดินอุ้มน้ำที่จะจ่ายน้ำออกมาได้เรียกว่าอัตราการให้น้ำจำเพาะ (Specific Yield, S_y) และคุณสมบัติที่เม็ดดินไม่สามารถจ่ายน้ำได้เรียกว่าอัตราคงค้างจำเพาะ (Specific Retention, S_r) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1.1) และ (3.1.3) และผลรวมของค่าทั้งสองก็คือค่าความพรุน (Porosity) ของมวลดิน

$S_y = 100(W_w/V) \dots\dots\dots(3.1.1)$

$S_r = 100(W_r/V) \dots\dots\dots(3.1.2)$



รูปที่ (3-5) ความสัมพันธ์ของค่าความพรุน อัตราการให้น้ำจำเพาะ และอัตราการคงค้างจำเพาะ ตามขนาดของเม็ดดิน



รูปที่ (3-6) ลักษณะช่องว่างภายในมวลดิน และหินที่มีผลต่อคุณสมบัติของชั้นดินอุ้มน้ำ

เมื่อ w_y = ปริมาณน้ำที่ไหลออกมาได้จากมวลดิน
 w_r = ปริมาณน้ำที่คงค้างอยู่ในมวลของดิน
 V = ปริมาตรรวมของมวลดิน

ลักษณะมวลดิน และ หินที่สามารถกักเก็บ และ ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดังแสดงในรูปที่ (3-6) ซึ่งสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

ในรูป (3-6 ก) เป็นลักษณะของมวลดินที่เกิดจากการตกตะกอน (Well-Sorted Sedimentary Deposit) และมีการกระจายขนาดของเม็ดดินไม่ดี (Poorly Graded) ส่วนใหญ่จะเป็นพวกกรวด และทราย การยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดินไม่ดี ทำให้ช่องว่างภายในมวลดินมีขนาดใหญ่ น้ำสามารถซึมผ่าน ได้เร็ว และมีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำได้ดี

รูป (3-6 ข) เป็นลักษณะของมวลดินที่เกิดจากการตกตะกอนเช่นกัน มีการกระจายขนาดของเม็ดดินดี ทำให้ช่องว่างภายในมวลดินมีขนาด และ ปริมาณน้อยลงทำให้ศักยภาพในการให้น้ำไม่ดี

รูป (3-6 ค) เป็นลักษณะมวลดินที่เกิดจากการตกตะกอน เม็ดดินส่วนใหญ่เป็นกรวดที่มีเนื้อพรุน ทำให้ช่องว่างภายในมวลดินมีมาก มีความพรุนสูง

รูป (3-6 ง) เกิดจากการตกตะกอนของมวลดินที่มีขนาดใหญ่ และมีแร่ธาตุหรือมวลดินที่มีขนาดเล็ก เข้าไปแทรกอยู่ภายในช่องว่าง ทำให้ช่องว่างภายในมวลดินมีน้อย ลักษณะมวลดินแบบนี้ ได้แก่ ดินที่มีกรวด ทราย ปนอยู่กับดินเหนียว

รูป (3-6 จ) เป็นลักษณะของหินที่เกิดจากการตกตะกอน และถูกทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในโดยปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบที่ละลายอยู่ ถูกน้ำกัดเซาะไป ทำให้เกิดเป็นโพรงขึ้นภายในเนื้อหิน เช่น หินปูน เป็นต้น

รูป (3-6 ฉ) เป็นลักษณะของหินซึ่งมีรอยแตกแยกภายในเนื้อหิน เนื่องมาจากการผุกร่อนทางกายภาพ (Physical Weathering) เช่น แรงกระทำจากภายในโลก (แผ่นดินไหว) หรือ การหดตัว หรือการขยายตัวของหินภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความดัน รอยแตกแยกเหล่านี้หากมีขนาดใหญ่ และ ต่อเนื่องกัน ก็สามารถกักเก็บ และยอมให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย

3.1.5 การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเป็นการเคลื่อนที่ภายในช่องว่างของมวลดิน (Flow

Through Porous Media) และโดยทั่วไปความเร็วของการไหลจะต่ำมาก เนื่องจากผลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ และ ตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่าน การไหลของน้ำใต้ดินจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก และสภาพทางธรณีวิทยาของชั้นดิน และชั้นหินที่มีการสะสมน้ำใต้ดิน การไหลของน้ำใต้ดินจะไหลจากที่มีพลังงานสูง ไปยังที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ

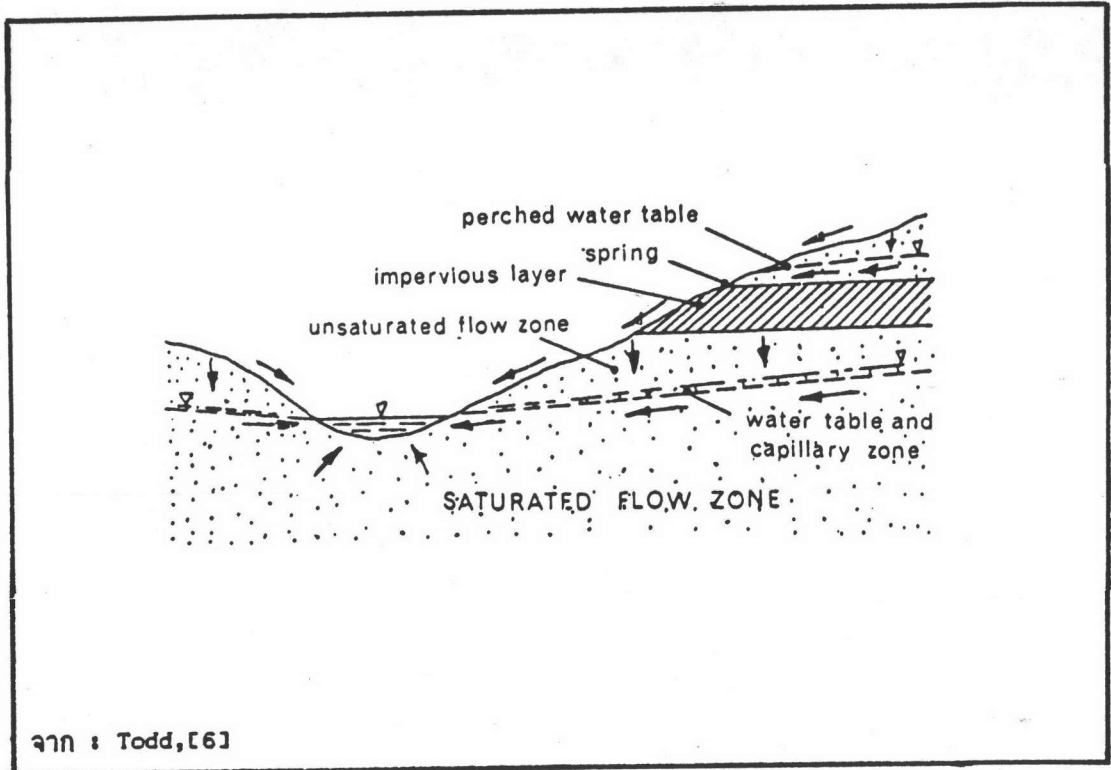
ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง สามารถหาได้จากการสำรวจค่าระดับน้ำภายในบ่อตั้งแต่ 3 บ่อขึ้นไป ซึ่งถ้าจำนวนบ่อมีมากกว่านี้ ก็จะทำให้สามารถหารูปแบบของการไหลครอบคลุมในพื้นที่ได้ การรู้ค่าระดับน้ำภายในบ่อบาดาลเทียบกับ หมุดระดับอ้างอิงทำให้สามารถเขียนเส้นแสดงความดัน (Equipotential Lines) และ เส้นแสดงทิศทางการไหล (Flow Lines) ของน้ำบาดาลในบริเวณที่ทำการศึกษาได้ โดยถือหลักดังนี้คือ เส้นแสดงการไหล (Flow lines) จะตั้งฉากกับเส้นแสดงระดับความดันเสมอ (Equipotential lines) และการไหลจะไหลจากที่มีความดันสูง ไปสู่ที่มีความดันต่ำเสมอ

โดยทั่วไปในธรรมชาติ การไหลของน้ำบาดาล จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ซึ่งจำแนกโดยอัตราส่วนของแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous Force) กับ แรงเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial Force) $(VL)/\nu$ มีค่าน้อยกว่า 1 หรือ Reynold Number < 1 ยกเว้นการไหลในกรณีที่มีช่องเปิดมีขนาดใหญ่ เช่นในโพรงของหินปูนที่ถูกกัดกร่อน และ ปฏิกริยาทางเคมี Henry Darcy (1856) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของน้ำผ่านท่อที่บรรจุตัวกลางที่มีรูพรุน พบว่า ความเร็วของการไหลซึมผ่านตัวกลาง เป็นปฏิภาคโดยตรงกับการสูญเสียพลังงาน (Head Loss) และ เป็นปฏิภาคกลับกับระยะทางของการไหล ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

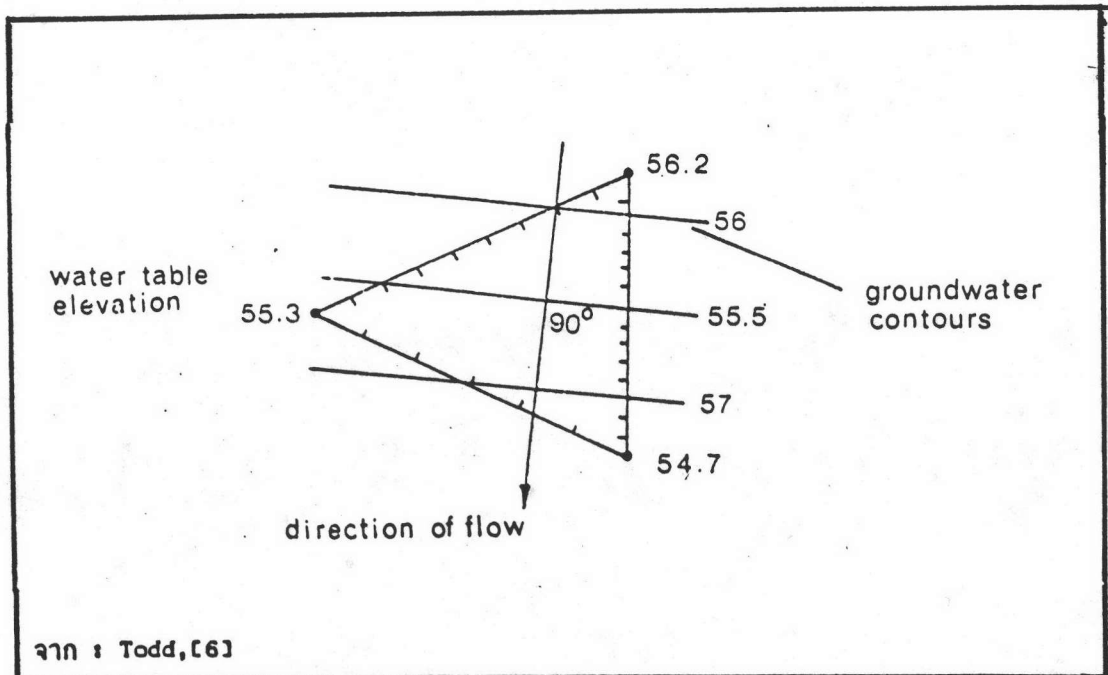
$$V = k(dh/dl) \\ = ki \dots\dots\dots(3.1.3)$$

- เมื่อ V = ความเร็วของการไหล
 k = สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability)
 i = ความลาดชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)

ข้อจำกัดกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) จากการทดลองปรากฏว่า สูตรของดาร์ซีจะใช้ได้อย่างถูกต้องเมื่อค่า Reynold Number มีค่าระหว่าง 1 - 10 เนื่องจากอนุภาคของน้ำจะมี



รูปที่ (3-7) การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในธรรมชาติ



รูปที่ (3-8) การหาดำแหน่งของเส้นแสดงระดับความดัน และทิศทางการไหลในกลุ่มของบ่อนบาดาล

ระยะทางของการไหลที่ไม่เท่ากัน เพราะว่าช่องว่างระหว่างเม็ดดินไม่แน่นอน มีความคดเคี้ยว จึงทำให้อนุภาคของน้ำมีความเร็ว และความเร่งแตกต่างกันการไหลแบบราบเรียบจึงไม่ได้เกิดขึ้นตลอดในตัวกลางที่มีรูพรุน โดยทั่วไปการไหลแบบราบเรียบจะเกิดขึ้น เมื่ออิทธิพลของแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous Force) มีมากกว่าอิทธิพลของแรงเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial Force) หากอิทธิพลของแรงเนื่องจากความเฉื่อยมีอิทธิพลเท่าเทียมกัน หรือสูงกว่าผลของแรงเนื่องจากความเฉื่อย สภาวะของการไหลก็จะเปลี่ยนไป ทำให้กฎของดาร์ซีใช้ไม่ได้

3.1.6 การสำรวจแหล่งน้ำใต้ดิน

การนำน้ำบาดาลที่มีอยู่ขึ้นมาใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องมีการเจาะ หรือ ขุดบ่อนบาดาล และสูบน้ำขึ้นมาใช้ การเจาะบ่อนบาดาลจะต้องกระทำในบริเวณที่แน่ใจว่ามีชั้นดินอุ้มน้ำ (Aquifer) เพียงพอกับความต้องการ ก่อนที่จะมีการเจาะบ่อนบาดาล จะต้องมีการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลเสียก่อน ขั้นตอนและวิธีการโดยทั่วไปประกอบด้วย

1) การสำรวจบนพื้นผิวดิน (Surface Exploration) เป็นการศึกษา และรวบรวมข้อมูลลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ก. ศึกษาแผนที่ภูมิประเทศเพื่อดูลักษณะความสูงต่ำของพื้นที่ และ ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปในบริเวณพื้นที่

ข. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับบ่อนบาดาลที่มีอยู่ เช่น บ่อน้ำตื้น หรือบ่อนบาดาลที่มีอยู่เดิม ก่อนการสำรวจ

ค. ตรวจสอบที่มาของแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น อ่างเก็บน้ำ เส้นทางไหลของทางน้ำธรรมชาติ เป็นต้น

ง. วิเคราะห์และศึกษาแผนที่อุทกธรณีวิทยาในบริเวณพื้นที่ (ถ้ามี) เพื่อตรวจสอบลักษณะชั้นดิน และชั้นหิน ที่มีอยู่ซึ่งอาจจะแสดงลักษณะของชั้นดินอุ้มน้ำในบริเวณพื้นที่

จ. ทำการสำรวจด้วยการเดินสำรวจในพื้นที่เพื่อหาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับธรรมชาติ ที่จะบ่งชี้ถึงการสะสมของน้ำใต้ดิน เช่น บริเวณน้ำขีมน้ำซับ หรือน้ำพุ เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะบ่งบอกถึงการกักเก็บของน้ำใต้ดินจะอยู่ใกล้ๆกับบริเวณดังกล่าว

ข้อมูลเหล่านี้จะช่วยในการพิจารณาบริเวณ หรือจุดที่เหมาะสม สำหรับการเจาะบ่อนบาดาล โดยเฉพาะบ่อน้ำตื้น (Shallow well) ข้อมูลเหล่านี้อาจไม่มีประโยชน์มากนักสำหรับกรณีที่เป็น

โครงการพัฒนาน้ำใต้ดินขนาดใหญ่ เพราะลักษณะการวางตัวของชั้นดิน ในชั้นดินที่อยู่ลึกลงไป อาจไม่มีความสัมพันธ์ใดๆกับลักษณะของชั้นดินที่อยู่ใกล้กับผิวดิน การสำรวจโครงการขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์พิเศษเข้าช่วยในการสำรวจ โดยใช้วิธีการทางธรณีฟิสิกส์ (Geophysical Method) ซึ่งที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity Method) และ วิธีการวัดแรงสั่นสะเทือน (Siesmic Refraction Method) สำหรับในประเทศไทยนิยมใช้วิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน โดยใช้เครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้า วัดความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน และชั้นหิน ในแต่ละชั้น และนำค่าตัวเลขความต้านทานที่ระดับความลึกต่างๆ เขียนออกมาเป็นกราฟ จากนั้นจึงทำการแปลความหมายจากกราฟ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่างๆชั้นดิน และ ชั้นหิน เช่น ความหนาแน่น ความพรุน และ ขนาดรูปร่างของมวลดิน

2) การสำรวจใต้ดิน (Subsurface Exploration) การสำรวจใต้ระดับผิวดินนี้ เป็นการเจาะหลุมเพื่อทำการสำรวจลักษณะของชั้นดินและชั้นหินที่แท้จริง ของในบริเวณพื้นที่ ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจบนผิวดิน จะช่วยในการกำหนดจุด หรือ บริเวณที่เหมาะสมในการเจาะบ่อสำรวจ สำหรับในกรณีของบ่อน้ำตื้น (Shallow Well) การเจาะหลุมสำรวจจะช่วยให้การประเมินระดับน้ำใต้ดิน (Water Table) ของชั้นดินอุ้มน้ำอิสระได้อย่างถูกต้องตามความเป็นจริง พร้อมทั้งยังสามารถใช้เป็นข้อมูล ในการประเมินความลึกของบ่อที่จะขุด และ ความสามารถของชั้นดินอุ้มน้ำของบ่อน้ำตื้น ในกรณีของบ่อน้ำตื้นหลุมเจาะสำรวจจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 10 เซนติเมตร (4 นิ้ว) และมีความลึกไม่เกิน 10-15 เมตร ซึ่งสามารถทำการเจาะโดยใช้เครื่องมือแบบง่ายๆ โดยใช้แรงคน ส่วนในการเจาะบ่อสำรวจเพื่อก่อสร้างบ่อบาดาล (Artesian Well) ที่มีความต้องการปริมาณน้ำที่มากกว่าบ่อน้ำตื้น จำเป็นต้องใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ หลุมที่เจาะจะมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาลักษณะของชั้นดิน และชั้นหิน ตลอดจนการประเมินประสิทธิภาพของชั้นดินอุ้มน้ำ จากตัวอย่างดินของชั้นดินอุ้มน้ำ ในระดับต่างๆที่ได้ทำการเจาะลงไปถึง การเจาะหลุมสำรวจไม่จำเป็นจะต้องมีขนาดใหญ่ ประมาณ 3-6 นิ้ว ข้อมูลสำคัญที่ได้จากบ่อสำรวจคือ ชนิด และประเภทของดินหรือหินที่ปรากฏอยู่ในบ่อสำรวจ โดยจะทำการบันทึกข้อมูลของชั้นดินที่ระดับความลึกต่างๆ โดยเฉพาะขนาด รูปร่าง และการกระจายขนาดของเม็ดดินของชั้นดินอุ้มน้ำ เพื่อใช้ในการพิจารณาประกอบการหาค่าระดับที่เหมาะสมในการวางตะแกรง เพื่อให้ น้ำซึมเข้าสู่บ่อบาดาล และ ความลึกของบ่อในขั้นตอนการก่อสร้าง ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพของชั้นดินอุ้มน้ำทำได้โดยการสูบน้ำทดสอบ (Pump Test) นอกจากวิธีการสูบน้ำทดสอบแล้ว ยังมีเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของ

ชั้นดินอุ้มน้ำอีกแบบหนึ่ง โดยใช้วิธีการของ (Borehole Geophysics) ซึ่งจะใช้ Electric Logs สองประเภทคือ Spontaneous Potential Log และ Resistivity Log โดยที่หลังจากทำการเจาะบ่อสำรวจได้ตามความลึกที่ต้องการ และได้ข้อมูลลักษณะของชั้นดินแล้ว ซึ่งการทดลอง Electric Logs ทั้งสองประเภทจะแตกต่างกัน สำหรับการวัดโดย Spontaneous Potential Log จะเป็นการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ส่วนการวัดด้วย Resistivity Log จะเป็นการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดิน โดยจะทำการวัดค่าความต่างศักย์ และความต้านทานระหว่าง Borehole Electrode กับ Surface Electrode ที่ระดับความลึกต่างๆ จากนั้นก็นำค่า Electric Logs ทั้งสองไปพล็อตความคู่กับลักษณะชั้นดินกับความลึก ดังแสดงในรูปที่ (3-9)

การเจาะหลุมสำรวจ มีวิธีการคล้ายกับการเจาะหลุมสำรวจชั้นดินเพื่อใช้ในการวางฐานรากของสิ่งก่อสร้างทั่วไป วิธีการเจาะหลุมสำรวจที่นิยมใช้กันได้แก่

ก) การใช้วิธีการกระแทก (Percussion Rig or Cable Tool) การใช้วิธีนี้จะใช้กับการเจาะหลุมที่มีความลึกมาก ในชั้นดินที่เป็น Consolidated Deposit ทำการเจาะโดยใช้การกระแทกของหัวเจาะ และลูกตุ้ม แล้วนำเอาเศษหินที่ถูกกระแทกขึ้นสู่ปากบ่อโดย กระทบอกตัก (Baller) ซึ่งจะถูกหย่อนลงไปกระทบทำให้ เศษหินและดินถูกแรงดันเข้าสู่ภายในกระทบอกเก็บ การเจาะในวิธีนี้เป็นการเจาะแบบแห้ง ไม่มีการใช้น้ำช่วยในการเจาะ

ข) การใช้น้ำกระแทก (Jetted Method) เป็นการเจาะหลุมสำรวจที่ใช้น้ำเป็นตัวกัดเซาะ และนำเศษดินและหินขึ้นสู่ปากบ่อ โดยใช้น้ำที่มีความดันสูง สูบผ่านแกนเจาะที่เป็นท่อเหล็ก กลวงลงไปยังหัวเจาะ กระแสน้ำที่ฉีดออกมาจะชะล้างดินที่กั้นหลุมให้หลุดออกเป็นชิ้นเล็กๆ และจะถูกพัดพาขึ้นสู่ปากบ่อ ซึ่งมักจะมีท่อนดินภายในบ่อเจาะ การเจาะโดยวิธีนี้เหมาะสำหรับชั้นดินที่เป็น Unconsolidated Deposit วิธีการนี้ใช้สำหรับเจาะหลุมที่มีความลึกปานกลาง ประมาณ 50 ถึง 60 เมตร และไม่มีชั้นหินแข็งหรือกรวดหยาบที่มีขนาดใหญ่ และค่อนข้างแข็ง

ค) การใช้หัวเจาะแบบสว่าน (Rotary Rig) ใช้หลักการทำงานเหมือนสว่าน โดยใช้น้ำโคลนเป็นตัวหล่อลื่น และนำเอาเศษดินและหินขึ้นมายังปากหลุม ในขณะเดียวกันจะช่วยไม่ให้หลุมพัง การเจาะโดยวิธีนี้สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง มีความรวดเร็วสูงมาก สามารถทำการเจาะความลึกได้ถึง 2,500 ฟุต และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ถึง 20 นิ้ว ขึ้นอยู่กับขนาดของหัวเจาะ

3.1.6 การออกแบบและการก่อสร้างบ่อบาดาล

บ่อบาดาลเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์ ซึ่งคุณสมบัติของบ่อจะต้องมีความสามารถในการให้น้ำได้ตามอัตราที่ต้องการ มีอายุการใช้งานที่นาน และมีประสิทธิภาพคงที่ตลอดการใช้งาน การสูบน้ำจากบ่อบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์ น้ำที่ไหลเข้าสู่บ่อจะต้องไหลผ่านชั้นดินอุ้มน้ำมาก่อน ซึ่งประกอบด้วยมวลดิน และหินที่มีช่องว่างเล็กๆที่ใช้เป็นที่เก็บสะสมปริมาณน้ำ และเป็นทางผ่านของน้ำในการไหลเข้าสู่บ่อบาดาล การไหลของน้ำในชั้นดินอุ้มน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเมื่อมีการไหลของน้ำก็จะมีกรพัดพาเอาตะกอนเล็กๆติดมาด้วย ตะกอนเล็กๆเหล่านี้ถ้ามีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดการอุดตัน หรือไหลผ่านทะลุตะแกรงเข้าไปตกตะกอนภายในบ่อบาดาล ทำให้พื้นที่หน้าตัดในการรับน้ำลดลง และการซึมผ่านเข้าสู่บ่อบาดาลมีประสิทธิภาพลดลง ในการออกแบบและก่อสร้างบ่อบาดาล จึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัญหาดังกล่าวเพื่อหาทางป้องกันและแก้ไข เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง และมีอายุการใช้งานนานที่สุด

ในการออกแบบบ่อบาดาล จะมีตัวกำหนดที่ต้องคำนึงถึงมากมาย เช่น การกระจายขนาดของเม็ดดิน ความหนาของชั้นดินอุ้มน้ำ ฯลฯ การออกแบบจะอาศัยข้อมูลที่ได้จากบ่อสำรวจซึ่งสามารถพัฒนาให้เป็นบ่อบาดาลได้ ถ้าหากมีคุณสมบัติที่เหมาะสม โดยปกติการออกแบบตะแกรง (Screen) ของบ่อบาดาลจะมีอยู่ 2 แบบ

1) Natural Pack ส่วนใหญ่ของบ่อบาดาลที่ทำในประเทศไทย ซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่ จะเป็นในลักษณะที่เม็ดดินที่อยู่รอบบ่อบาดาล ในชั้นตะแกรง จะอยู่ในลักษณะธรรมชาติ การออกแบบขนาดตะแกรงของบ่อบาดาลจะอาศัยขนาด และรูปร่างของตัวอย่างชั้นดินที่อุ้มน้ำ ที่ระดับความลึกที่ต้องการจากบ่อสำรวจ

2) Artificial Pack จะเป็นการเลือกเอาเม็ดวัสดุที่มีขนาดหยากกว่า และสม่ำเสมอกว่าเข้าไปแทนที่เม็ดดินที่อยู่รอบ ๆ บ่อบาดาลในชั้นที่จะวางตะแกรง การทำ Artificial Pack จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของบ่อบาดาลขึ้นเป็นอย่างมาก เพราะจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของน้ำที่ไหลเข้าสู่บ่อ มีหน้าตัดเพิ่มขึ้นโดยปกติจะเป็นกำลังสองของค่ารัศมีที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยทำหน้าที่คอยดักตะกอนที่จะไหลเข้าสู่บ่อบาดาลอีกด้วย

ปัจจัยสำคัญสำหรับการพิจารณาออกแบบบ่อบาดาลก็คือ การกระจายขนาดของเม็ดดินของชั้นดินอุ้มน้ำ บ่อบาดาลที่เจาะในบริเวณพื้นที่ที่ชั้นดินอุ้มน้ำเป็นหินร่วน และไม่มีการเชื่อมแน่นของเม็ดดิน จะใช้ตัวอย่างดินที่ได้จากหลุมสำรวจไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการร่อนผ่านตะแกรง

ขนาดต่างๆ เพื่อหาการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Gradation) และนำไปพล็อตกราฟแสดงการกระจายขนาดของเม็ดดิน และเปอร์เซ็นต์ขนาดของเม็ดดินที่มีอยู่ในมวลดินตัวอย่าง โดยมีจุดประสงค์เพื่อ

- 1) เพื่อหาขนาดความละเอียดของตัวอย่างชั้นดินอุ้มน้ำ (% fines)
- 2) เพื่อหาลักษณะความลาดของโค้งการกระจายขนาดของเม็ดดิน
- 3) เพื่อหาคุณลักษณะของชั้นดินอุ้มน้ำ จากรูปร่างของเม็ดดินของชั้นดินอุ้มน้ำ และโค้งแสดงการกระจายขนาดของชั้นดินอุ้มน้ำ

การบอกลักษณะของชั้นดินอุ้มน้ำนิยมใช้กันอยู่ 2 ระบบคือ ระบบของ MIT-Grain-Size Classification และระบบของ Bureau of Soil Grain-Size Analysis ซึ่งได้จัดแบ่งไว้ดังนี้

ตารางที่ (3-1) การแบ่งขนาดของเม็ดดินตามระบบของ MIT และ Bureau of Soil

	MIT System	Bureau of Soil System
Fine Gravel	0.080 - 0.075 inch	0.040 - 0.080 inch
Coarse Sand	0.024 - 0.080 inch	0.020 - 0.040 inch
Medium Sand	0.010 - 0.024 inch	0.010 - 0.020 inch
Silt & Clay	< 0.003 inch	< 0.002 inch

ค่าขนาดประสิทธิภาพของเม็ดดิน (Effective Grain Size) จะเป็นตัวบอกลักษณะความละเอียดของมวลดินตัวอย่าง ซึ่งใช้ในการออกแบบบ่อบาดาล ค่าขนาดประสิทธิภาพหมายถึงขนาดของตะแกรงที่มวลดินของชั้นดินอุ้มน้ำตกค้างอยู่บนตะแกรงทั้งหมด 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความลาดของโค้งแสดงการกระจายขนาดของเม็ดดินจะบอกถึงความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของขนาดของเม็ดดิน โดยปกติเมื่อก้าวถึงความลาดของโค้งการกระจายของเม็ดดินจะหมายถึงค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของขนาดของเม็ดดิน (Uniformity Coefficient, C_u) ซึ่งในที่นี้หมายถึงค่าความลาดเฉลี่ยของ โค้งแสดงการกระจายขนาดของเม็ดดิน ในช่วงความละเอียดตั้งแต่ 40 - 90 เปอร์เซ็นต์ กำหนดโดยอัตราส่วนขนาดตะแกรงที่เม็ดดินตกค้างอยู่บนตะแกรง 40 เปอร์เซ็นต์ กับค่าขนาดประสิทธิภาพ ชั้นดินอุ้มน้ำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของเม็ดดินต่ำ แสดงว่ามีความ

สม่าเสมอของขนาดของเม็ดดินมาก และค่าที่ถูกนำมาพิจารณาาก็คือค่า Sorting Coefficient จะกำหนดได้โดยค่ารากที่ 2 ของอัตราส่วนระหว่างขนาดของเม็ดดินที่ 25 เปอร์เซ็นต์ กับขนาดเม็ดดินที่ 75 เปอร์เซ็นต์

$$\text{Sorting Coefficient} = ((25 \% \text{ Size}) / (75 \% \text{ Size}))^{1/2}$$

การทำ Artificial Pack จะทำในกรณีที่ชั้นดินอุ้มน้ำเป็นหินร่วน และมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่าเสมอน้อยกว่า 3.0 และมีขนาดประสิทธิผลน้อยกว่า 0.01 นิ้ว การทำ Artificial Pack ก็เพื่อให้โครงสร้างของเม็ดดินมีความมั่นคง ไม่เกิดการทรุดตัวเมื่อมีการสูบน้ำ และอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะไม่สามารถเข้ามาตกตะกอนภายในบ่อ ทำให้พื้นที่ในการขีมน้ำมีมากขึ้น การเลือกใช้วัสดุต้องเลือกใช้กรวดที่มีขนาดเหมาะสม โดยมากจะเลือกใช้กรวดที่มีขนาดเป็น 5 เท่า ของขนาด 50 เปอร์เซ็นต์ของชั้นดินอุ้มน้ำ โดยจะมีการใช้กรวดขนาดนี้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความหนาอยู่ระหว่าง 6 - 9 นิ้ว ขนาดของกรวดควรมีขนาดสม่าเสมอ และขนาดของช่องตะแกรงควรมีขนาดอย่างน้อย 90 เปอร์เซ็นต์ ของขนาดวัสดุที่ใช้

การทำ Natural Pack จะเป็นเพียงการเลือกขนาด และลักษณะของช่องตะแกรงที่จะใช้เพื่อให้น้ำซึมเข้าสู่บ่อได้สะดวก โดยจะยึดผลการวิเคราะห์ลักษณะของชั้นดินอุ้มน้ำ และลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินเป็นหลัก ซึ่งสิ่งที่จะคำนึงถึงมากที่สุดคือการทรุดตัวของชั้นดินอุ้มน้ำ เมื่อมีการสูบน้ำออกไป และจะทำให้ความดันของน้ำภายในมวลดิน (Pore Pressure) ลดต่ำลงทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดินในส่วนที่จมอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินในสภาวะปกติ

การเลือกความยาวของตะแกรง การใส่ตะแกรงภายในบ่อบาดาล โดยทั่วไปมักจะใส่ตะแกรงให้มีความยาวมากที่สุด เท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะพิจารณาจากความหนาของชั้นดินอุ้มน้ำ การใส่ตะแกรงในลักษณะนี้จะทำให้ได้พื้นที่ในการรับน้ำมากที่สุด ทำให้ความเร็วของการไหลของน้ำใต้ดินที่จะเข้าสู่บ่อบาดาลต่ำลงด้วย ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณตะกอนที่เข้ามาอุดตัน หรือเข้าไปตกตะกอนภายในบ่อ สำหรับชั้นดินอุ้มน้ำอิสระขนาดความยาวที่ดีที่สุดที่จะทำให้ได้ผลผลิตจากชั้นดินอุ้มน้ำที่ดีที่สุดควรมีความยาวของตะแกรงประมาณ 0.3-0.5 เท่าของความหนาของชั้นดินอุ้มน้ำ เนื่องจาก การลดลงของระดับน้ำเมื่อมีการสูบน้ำ ระดับน้ำในบ่อควรจะรักษาระดับอยู่ที่ส่วนบนสุดของตะแกรงเสมอ ส่วนในชั้นดินอุ้มน้ำภายใต้ความกดดัน มักจะใส่ความยาวของตะแกรงให้มีความยาวเท่ากับ ความหนาของชั้นดินอุ้มน้ำ ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาความยาวของตะแกรงป้องกันเศษหิน หรือเม็ดดิน

ที่จะไหลเข้าสู่บ่อประกอบด้วย

- 1) ค่าพื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตะแกรง
- 2) คุณสมบัติของชั้นดินอุ้มน้ำ
- 3) ราคาของตะแกรง
- 4) ความต้องการปริมาณน้ำจากบ่อบาดาล
- 5) อายุการใช้งานของบ่อ

ความยาวของตะแกรงยังต้องคำนึงถึง ความเร็วของน้ำที่จะไหลเข้าสู่บ่อ เพราะจะมีอนุภาคเล็กที่ไหลมาด้วย จะมาเกาะรอบๆบริเวณตะแกรง ปริมาณที่จะเข้ามาอุดตันนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่าง และขนาดของรูตะแกรง โดยปกติครึ่งหนึ่งของพื้นที่เปิดของรูตะแกรงจะถูกอุดตันโดยวัสดุที่ประกอบเป็นชั้นดินอุ้มน้ำ ดังนั้นปริมาณพื้นที่ประสิทธิภาพของช่องเปิดก็จะเหลือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เพื่อให้แน่ใจว่าบ่อผลิตน้ำบาดาลจะสามารถมีอายุการใช้งานตามต้องการ และมีประสิทธิภาพคงที่จึงควรให้ความเร็วของการไหลที่จะเข้าสู่บ่อบาดาลอยู่ระหว่าง 2-12 ฟุตต่อนาที โดยปกติชั้นดินอุ้มน้ำที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำจะประกอบไปด้วยอนุภาคของเม็ดดินที่มีขนาดเล็ก และมีมักเกิดการอุดตันได้ง่าย ความเร็วที่เหมาะสมที่จะไหลเข้าสู่ตะแกรงจะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นดินอุ้มน้ำ ซึ่งจากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และค่าความเร็วที่เหมาะสมที่ปากทางเข้าสู่ช่องเปิดของตะแกรง (Optimum Screen Entrance Velocity) ได้แสดงดังในตารางที่ (3-2)

ตารางที่ (3-2) ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และค่าความเร็วที่เหมาะสมที่ทางเข้า

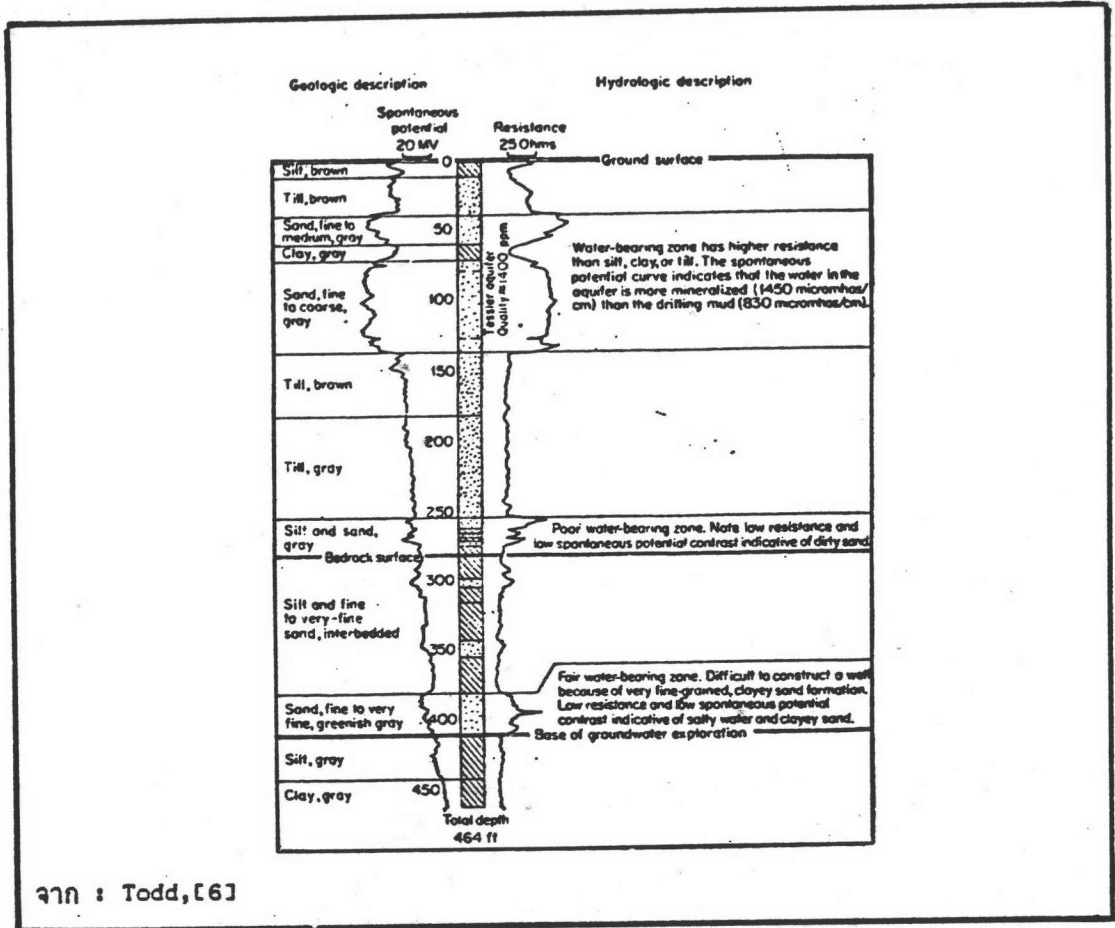
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน Coefficient of Permeability (gpd/ft ² .)	ความเร็วที่เหมาะสมที่ปากทางเข้าของตะแกรง Optimum Screen Entrance Velocity) (ft./min.)
> 6,000	12
6,000	11
5,000	10
4,000	9

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน Coefficient of Permeability (gpd/ft ² .)	ความเร็วที่เหมาะสมที่ปากทางเข้าของตะแกรง Optimum Screen Entrance Velocity) (ft./min.)
3,000	8
2,500	7
2,000	6
1,500	5
1,000	4
500	3
< 500	2

3.1.8 พลศาสตร์ของบ่อนาดาล

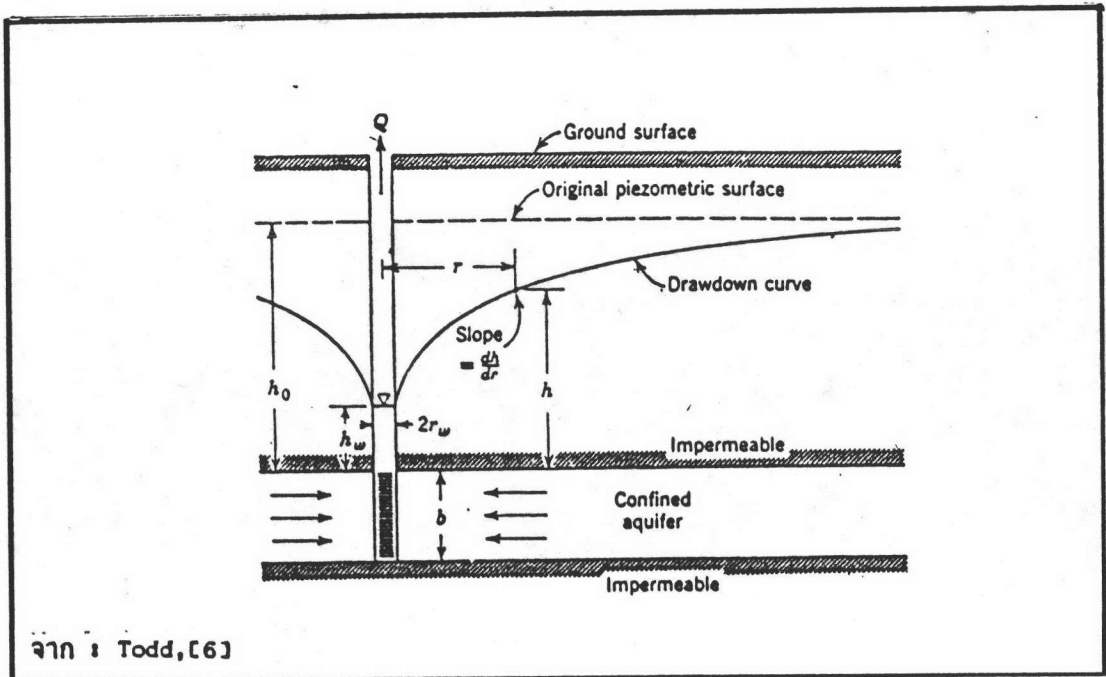
เมื่อทำการสูบน้ำจากบ่อนาดาล ระดับน้ำภายในบ่อจะลดลงเพื่อให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงาน เพื่อให้ น้ำจากชั้นดินอุ้มน้ำไหลเข้าสู่บ่อนาดาล ซึ่งค่าระดับน้ำภายในบ่อที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการสูบน้ำออกจากบ่อนาดาล ในการสูบน้ำจากบ่อนาดาลเมื่อทำการสูบน้ำไปเรื่อยๆจนถึงจุดจุดหนึ่ง จะเกิดสภาวะสมดุลขึ้นซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนาน การศึกษาพลศาสตร์ของบ่อนาดาลโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ เมื่อไม่มีปริมาณน้ำจากภายนอกเข้ามาเสริมคือ

1) การไหลแบบคงที่สู่บ่อนาดาล (Steady Radial Flow to a Well) สำหรับกรณีการไหลแบบคงที่สู่บ่อนาดาลในชั้นดินอุ้มน้ำภายใต้ความดัน โดยทั่วไปบ่อนาดาลแบบนี้จะพยายามทำให้พื้นที่หน้าตัดของการไหลมีค่ามากที่สุด โดยการเจาะทะลุชั้นดินอุ้มน้ำตลอดความหนาของชั้นดินที่ได้จากการสำรวจ การวิเคราะห์การไหลของปริมาณน้ำที่จะเข้าสู่บ่อนาดาลในลักษณะนี้จะสมมุติให้ ชั้นดินอุ้มน้ำมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Homogeneous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอด (Isotropic) ในทุกทิศทาง การไหลเข้าสู่บ่อนาดาลจะมีทิศทางไหลในแนวราบเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถใช้ข้อสมมุติฐานของ Dupuit (Dupuit's Assumption) โดยพิจารณาและกำหนดนิกัดให้ตำแหน่งของบ่อที่ทำการสูบน้ำเป็นจุดกำเนิด ปริมาณน้ำที่จะไหลเข้าสู่บ่อที่ระยะทาง r จากจุดกำเนิดคือ



จาก : Todd, [6]

รูปที่ (3-9) แสดงลักษณะของชั้นดิน และผลการทดสอบ Electric Logs ทั้งสองวิธี



จาก : Todd, [6]

รูปที่ (3-10) แสดงการไหลแบบคงที่ของน้ำใต้ดินสู่บ่อบาดาล

$$Q = Av = 2\pi rbK (dh/dr) \dots\dots\dots(3.1.4)$$

เมื่อ b = ความหนาของชั้นดินอุ้มน้ำ

K = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นดินอุ้มน้ำ

โดยการจํารูปสมการใหม่แล้วทำการอินทิเกรต โดยกำหนดขอบเขตของการอินทิเกรตคือ $h = h_w$ ที่ $r = r_w$ จนถึง $h = h$ และ $r = r$ จะได้สมการการลดลงของระดับน้ำภายในบ่อ และสมการของอัตราการไหลสู่บ่อบาดาลดังนี้คือ

$$h - h_w = (Q/2\pi Kb)(\ln(r/r_w)) \dots\dots\dots(3.1.5)$$

$$Q = 2\pi Kb (h-h_w)/\ln(r/r_w) \dots\dots\dots(3.1.6)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าของ h จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อ r มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าสูงสุดของ h ก็คือค่าของ $h = h_w$ เมื่อก่อนเริ่มทำการสูบน้ำจากบ่อบาดาล สมการที่ (3.1.6) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นดินอุ้มน้ำ เมื่อทำการสูบบ่อด้วยอัตราการไหลคงที่ และค่าระดับน้ำภายในบ่อทดสอบมีค่าคงที่

2) การไหลแบบไม่คงที่สู่บ่อบาดาล (Unsteady Radial Flow to a Well) เมื่อทำการสูบน้ำจากบ่อบาดาลเป็นเวลานานๆ อิทธิพลของการสูบน้ำจะขยายแผ่กว้างออกไปในแนวรัศมีเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุลซึ่งโดยทั่วไปจะกินเวลานาน สมการที่จะนำมาประยุกต์กับกรณีการไหลไม่คงที่ ในรูปของ Polar Coordinate ก็คือ

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots(3.1.7)$$

เมื่อ T คือค่าสัมประสิทธิ์ของการผ่าน (Transmissibility) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของความหนาของชั้นดินอุ้มน้ำ (b) กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) และ t เป็นเวลาตั้งแต่เริ่มต้นเมื่อทำการสูบน้ำ Thies ได้เสนอการแก้สมการที่ (3.1.7) โดยใช้หลักการของความคล้ายคลึงระหว่างการไหลของน้ำใต้ดิน และการนำความร้อน (Heat Conduction) โดย Thies ได้เสนอการแก้สมการ (3.1.7) ในรูปสมการใหม่ดังนี้

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad \dots\dots\dots(3.1.8)$$

โดยเทอมของ $u = r^2 S / 4tT$ และ $Q =$ อัตราการสูบน้ำจากบ่อบาดาล ซึ่งมีค่าคงที่ตลอด และ S คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Coefficient) รูปของการอินทิเกรตจะเป็นฟังก์ชันกับค่าขอบเขตที่ต่ำที่สุด (Lower Limit) จากการขยายรูปของการอินทิเกรตเป็น Convergent Series สมการที่ (3.1.8) สามารถเขียนได้เป็น

$$h_0 - h = Q/4 T (-0.5772 - \ln u + u - (u^2/2.2!) + (u^3/3.3!) + (u^4/4.4!) \dots)$$

$$h_0 - h = (Q/4 t) (W(u))$$

สำหรับสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์จะใช้ข้อสมมติฐานแบบเดียวกับกรณีการไหลแบบคงที่สูบบ่อบาดาล เนื่องจากการหาคำตอบที่แท้จริงของสมการที่ (3.1.8) ทำได้ยาก จึงได้มีการหาคำตอบจากสมการโดยวิธีการประมาณ ซึ่งได้มีผู้เสนอวิธีการแก้สมการดังกล่าวหลายท่าน เช่น Theis, Jacob, และ Chow เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงแต่เฉพาะวิธีการของ Theis

วิธีการของ Theis ได้เขียนสมการ (3.1.8) ใหม่ในรูปของสมการดังนี้

$$h_0 - h = (114.6/T) Q (W(u)) \quad \dots\dots\dots(3.1.9)$$

ในเมื่อ $h_0 - h$ คือ ค่าการลดลงของระดับน้ำในหน่วยของ ฟุต Q คือ ค่าอัตราการสูบน้ำออกจากบ่อ (Well Discharge) โดยมีหน่วยเป็น แกลลอนต่อนาที T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การผ่าน Transmissibility) มีหน่วยเป็น แกลลอนต่อวันต่อฟุต และ $W(u)$ คือค่า Well Function ซึ่งเป็น Exponential Integral โดยที่ค่า $u = 1.87 r^2 S / Tt$ เมื่อ S คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ ซึ่งไม่มีหน่วย r คือ ระยะทางจากบ่อที่ทำการสูบน้ำ จนถึงบ่อที่ทำการสังเกตการลดลงของระดับน้ำมีหน่วยเป็นฟุต และ t คือ เวลาที่นับเริ่มจากเมื่อทำการสูบน้ำ มีหน่วยเป็นวัน เพื่อที่จะคำนวณหาค่าของ S และ T จากข้อมูลที่ได้จากการสูบน้ำเพื่อทำการทดสอบ ซึ่ง Theis ได้เสนอวิธีการที่เรียกว่า Method of Superposition โดยในขั้นแรกจะทำการพล็อตค่าของ $W(u)$ และ u ดังในตารางที่ (3-5) ในกระดาษกราฟเลขยกกำลัง ซึ่งโค้งที่พล็อตได้จะเรียกว่า Type Curve และจากการทดสอบในภาคสนามจะได้ค่าการลดลงของระดับน้ำ (Drawdown) และค่า

r^2/t ทำการพล็อตค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองในกระดาษกราฟเลขยกกำลัง ซึ่งมีการแบ่งสเกลที่เหมือนกันโค้งที่ได้จากการพล็อตค่า $h - h_0$ กับ r^2/t จะนำไปทาบกับ Type Curve โดยให้แกนทั้งสองขนานกันตลอด ทำการขยับกระดาษกราฟทั้งสองจนกระทั่งส่วนโค้งบนเส้นกราฟทั้งสองทับกันมากที่สุด จากนั้นก็จะเลือกจุดที่เส้นกราฟทั้งสองทับกันสนิทอ่านค่าตัวแปรต่างๆที่ทำการพล็อตแล้วนำเอาตัวแปรเหล่านี้แทนค่าในสมการที่ (3.1.9) และ $u = 1.87 r^2 S / Tt$ เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์ในการส่งถ่าย (Transmissibility) ของชั้นดินอุ้มน้ำ ซึ่งจะทำให้สามารถประเมินศักยภาพของชั้นดินอุ้มน้ำได้อย่างคร่าวๆ

ส่วน Chow ได้เสนอวิธีการในการแก้ปัญหา เพื่อประเมินคุณสมบัติของชั้นดินอุ้มน้ำ โดยจะใช้ค่าการลดลงของระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ ที่ระยะเวลาต่างๆกัน หลังจากเริ่มสูบน้ำด้วยอัตราการไหลคงที่ แล้วทำการพล็อตค่าการลดลงของระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ กับเวลาตั้งแต่เริ่มต้นสูบน้ำ ในกระดาษกราฟ Semi-log แล้วเลือกจุดใดจุดหนึ่งเพื่ออ่านค่าการลดลง และเวลา t ที่จุดดังกล่าว แล้วลากเส้นสัมผัสผ่านจุดดังกล่าว เพื่อหาค่า h ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของค่าการลดลงของระดับน้ำต่อระยะเวลาหนึ่งรอบของตารางล็อก จากนั้นจะคำนวณค่า $F(u)$ ได้โดย $F(u) = (h_0 - h) / h$ จากนั้นนำเอาที่ได้จากการคำนวณ ไปอ่านค่า $w(u)$ และ u จากกราฟที่เสนอโดย Chow ดังแสดงในรูปที่ (ค.1) ซึ่งเมื่อทราบค่า $w(u)$ และ u ก็สามารถหาค่าความสามารในการส่งถ่าย และค่าสัมประสิทธิ์ในการกักเก็บของชั้นดินอุ้มน้ำ โดยใช้สมการที่ (3.1.9) และ $S = utT / 1.87r^2$

ตารางที่ (3-5) ความสัมพันธ์ระหว่าง $W(u)$ และ u

u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
* 1	0.219	0.049	0.013	.0038	.0011	.00036	.00012	.000038	.000012
* 10^{-1}	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
* 10^{-2}	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
* 10^{-3}	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.25	4.14
* 10^{-4}	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
* 10^{-5}	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74
* 10^{-6}	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
* 10^{-7}	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
* 10^{-8}	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
* 10^{-9}	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
* 10^{-10}	22.45	21.76	21.35	21.05	20.84	20.66	20.50	20.37	20.25
* 10^{-11}	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
* 10^{-12}	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
* 10^{-13}	29.36	28.66	28.26	27.97	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
* 10^{-14}	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
* 10^{-15}	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76

3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องสูบน้ำ

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงความรู้เกี่ยวกับเครื่องสูบน้ำ ประกอบด้วย ทฤษฎีที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หลักการการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ชนิดของเครื่องสูบน้ำ และลักษณะการใช้งานในเครื่องสูบน้ำแต่ละชนิด เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาปรับปรุงเทคโนโลยีทางด้านนี้ต่อไป

3.2.1 หลักการเบื้องต้นของการเคลื่อนที่ของการไหล

การศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหล นั้นโดยทั่วไปเราหมายถึง สสารที่ไม่คงตัว แต่จะมีรูปร่างตามภาชนะที่บรรจุ เช่น น้ำ น้ำมัน และ ก๊าซ เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นของของไหลที่เป็นน้ำเท่านั้น

ของไหลจะประกอบไปด้วยอนุภาคจำนวนมาก เช่นเดียวกับของแข็ง แต่การยึดจับของอนุภาคของของไหลไม่แน่นเท่ากับการยึดจับของอนุภาคของของแข็ง ดังนั้น รูปร่างของของไหลจึงเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของของไหลจึงไม่คงที่ ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1) ในทัศนะของออยเลอร์ (Eulerian Viewpoint) เป็นการพิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหลภายในพื้นภูมิ ซึ่งจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆที่เป็นคุณสมบัติของการไหล และคุณสมบัติของของไหล เช่น ความเร็ว ความเร่ง ความหนาแน่น และอื่นๆ ที่เวลา t ใดๆ และเมื่อเวลาผ่านไป dt ตัวแปรต่างๆเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร โดยที่พิจารณาที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งภายในพื้นภูมิที่พิจารณา

2) ในทัศนะของ ลากราง (Lagrangian Viewpoint) การพิจารณาการเคลื่อนที่ของของไหลผู้สังเกตจะติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลไป โดยเริ่มจากตำแหน่งเริ่มต้น และทิศทางที่อนุภาคของของไหลวิ่งไปในพื้นภูมิความเร็ว ฝึกัดจะเปลี่ยนไปตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค ดังนั้นทางที่อนุภาคเคลื่อนไป ตัวแปรที่เป็นคุณลักษณะของการไหล (Characteristics) ของอนุภาคของของไหลจะถูกติดตามโดยตลอดเมื่อเวลาผ่านไป

การที่จะเลือกใช้การศึกษาตามทัศนะของออยเลอร์ (Euler) หรือตามทัศนะของลากราง (Lagrangian) นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่พิจารณา แต่ปัญหาทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีการของออยเลอร์ เพราะเป็นการนิยามผลของมวลรวม

3.2.2 สมการการไหลของของไหลที่ไม่มีการอัดตัว

สมการของออยเลอร์ (Euler's Equation) ในการไหลของของไหลในหนึ่งมิติ (One - Dimensional Flow), Leonhard Euler ได้เป็นผู้ประยุกต์นำเอากฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law of motion) มาใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหล

พิจารณาเส้นของกระแสของของไหล (Stream Line) ในรูปที่ (3-11) และเลือกเอา ส่วนของทรงกระบอกของของไหลเป็นระบบสำหรับการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ (3-11) แรงที่มี ส่วนในการทำให้เกิดความเร่งต่อระบบก็จะมีแรงเนื่องจากความดัน (Pressure Forces) ใน ส่วนปลายของทรงกระบอกในแนวการเคลื่อนที่ทั้งสองด้าน $PdA - (P + dP) dA = - dPdA$ (ส่วนความดันทางด้านข้างของระบบถือว่าไม่มีผลต่อความเร่งของระบบ) ส่วนของน้ำหนักเนื่องจาก มวลของของไหลในทิศทางของการไหล $- \rho g dSdA (dz/dS) = \rho g dAdz$ ส่วนของมวลที่จะถูก กระทำให้เกิดความเร่งอันเนื่องมาจากการกระทำของส่วนของแรงเหล่านี้ก็คือ $dM = dSdA$ ใน การประยุกต์ กฎข้อที่สองของนิวตัน $dF = (dM)a$ ตลอดแนวของเส้นกระแส และใช้การไหลใน หนึ่งมิติในการอธิบาย จะได้สมการ (3.2.1) ดังนี้

$$-dPdA - \rho g dAdz = (\rho dSdA)(VdV/dS) \dots\dots\dots(3.2.1)$$

เมื่อนำมาตลอดด้วย dA ก็จะได้สมการของออยเลอร์ สำหรับการไหลในหนึ่งมิติดังนี้

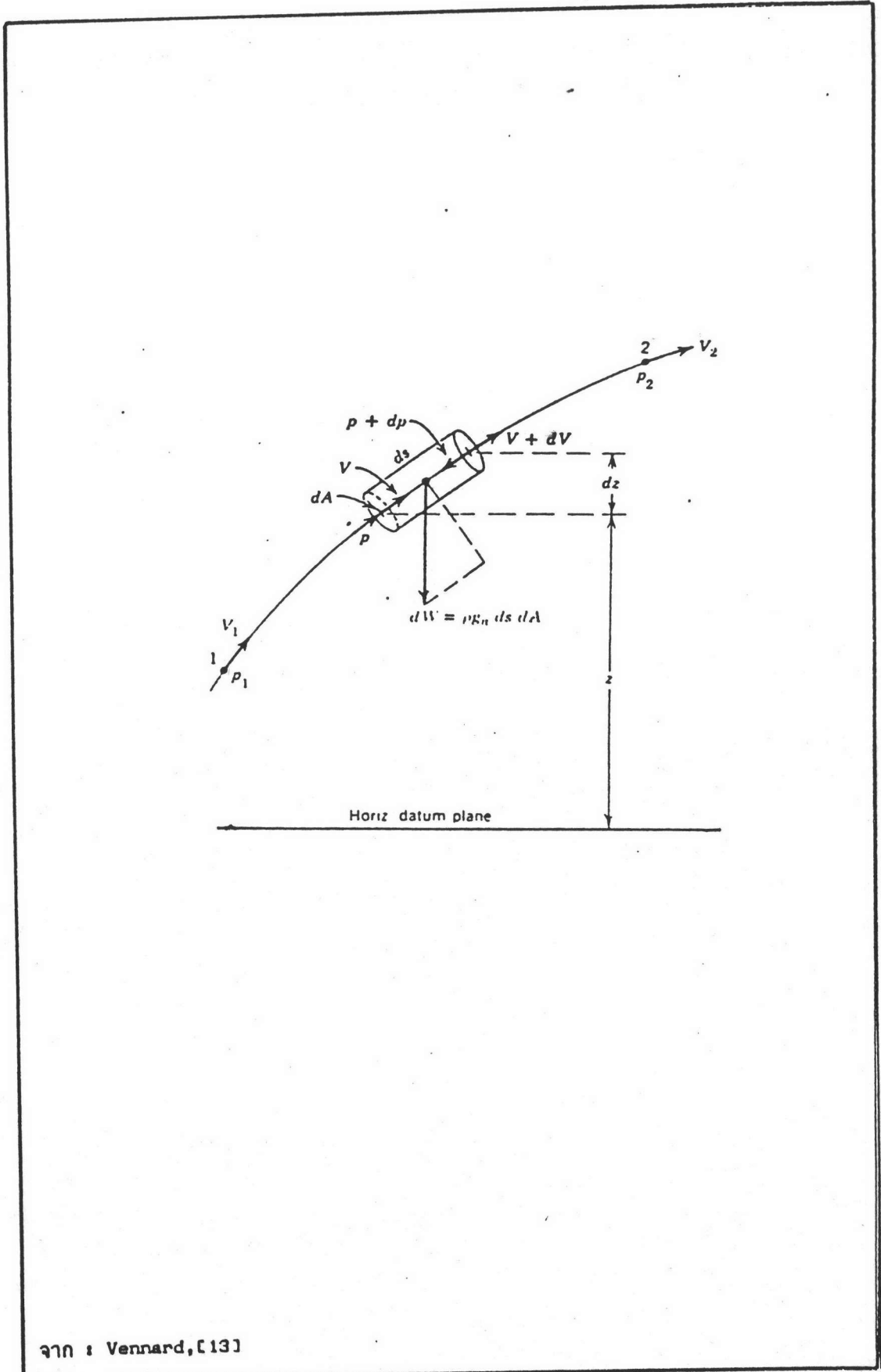
$$dP/\rho + VdV + gdz = 0 \dots\dots\dots(3.2.2)$$

สำหรับการไหลที่ไม่มีการอัดตัวของของไหล (Incompressible flow) โดยทั่วไปจะ หารด้วยค่าความเร่ง g เนื่องจากความโน้มถ่วงโลก ซึ่งสามารถเขียนในรูปของ

$$dP/\gamma + d(V^2/2g) + dz = 0 \dots\dots\dots(3.2.3)$$

หรือสำหรับการไหลที่มีความหนาแน่นคงที่ตลอด (Uniform Density)

$$d(P/\gamma + V^2/2g + Z) = 0 \dots\dots\dots(3.2.4)$$



รูปที่ (3-11) การวิเคราะห์สมการการไหล โดยกฎข้อที่สองของนิวตัน

3.2.3 สมการพลังงานของการไหล (สมการเบอร์นูลี)

สำหรับการไหลของของเหลวที่ไม่มีการอัดตัวหรือของไหลที่มีความหนาแน่นคงที่ตลอด สมการการไหลในหนึ่งมิติของออยเลอร์สามารถเขียนได้ดังนี้ (เพราะว่า p และ z มีค่าคงที่ทั้งสองค่า)

$$P_1/\gamma + V_1^2/2g + Z_1 = P_2/\gamma + V_2^2/2g + Z_2 \quad \dots\dots(3.2.5)$$

ที่จุด (1) และ (2) เป็นจุดสองจุดที่อยู่บนเส้นกระแสเดียวกันสมการที่ (3.2.5) ก็คือ

$$P/\gamma + V^2/2g + Z = H = \text{ค่าคงที่} \quad \dots\dots\dots(3.2.6)$$

โดยการประยุกต์กับทุก ๆ จุดบนเส้นกระแสเดียวกัน ก็จะได้ความสัมพันธ์ที่มีประโยชน์อย่างยิ่งของความดัน ขนาดของความเร็ว และความสูง จากระดับอ้างอิง สมการ (3.2.6) นี้ก็คือ สมการเบอร์นูลีนั่นเอง และเทอมของ $H = \text{ค่าคงที่}$ ก็คือค่าของหัวรวมพลังงานทั้งหมดของการไหล

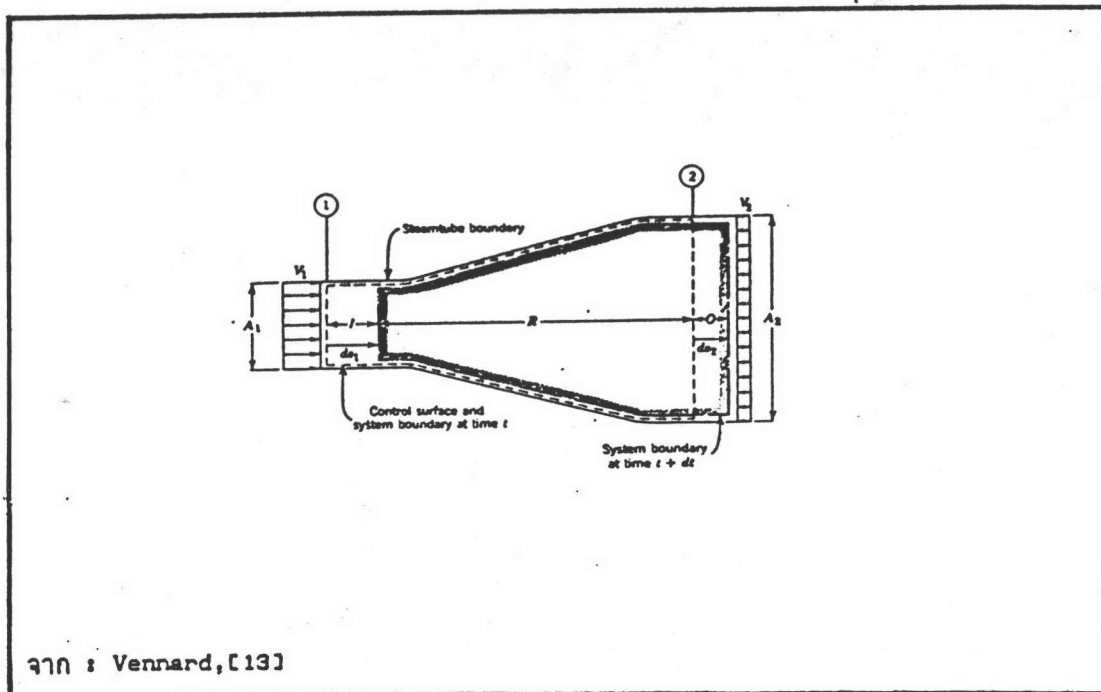
3.2.4 สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลคงที่ในหนึ่งมิติ

การประยุกต์เอากฎการคงตัวของมวลสำหรับการไหลคงที่ (Steady flow) ในปริมาตรควบคุมที่พิจารณาผลก็คือ สมการของความต่อเนื่อง (Equation of Continuity) ซึ่งได้อธิบายถึงความต่อเนื่องของการไหล จากหน้าตัดหนึ่งไปยังอีกหน้าตัดหนึ่งของปริมาตรควบคุมที่พิจารณา

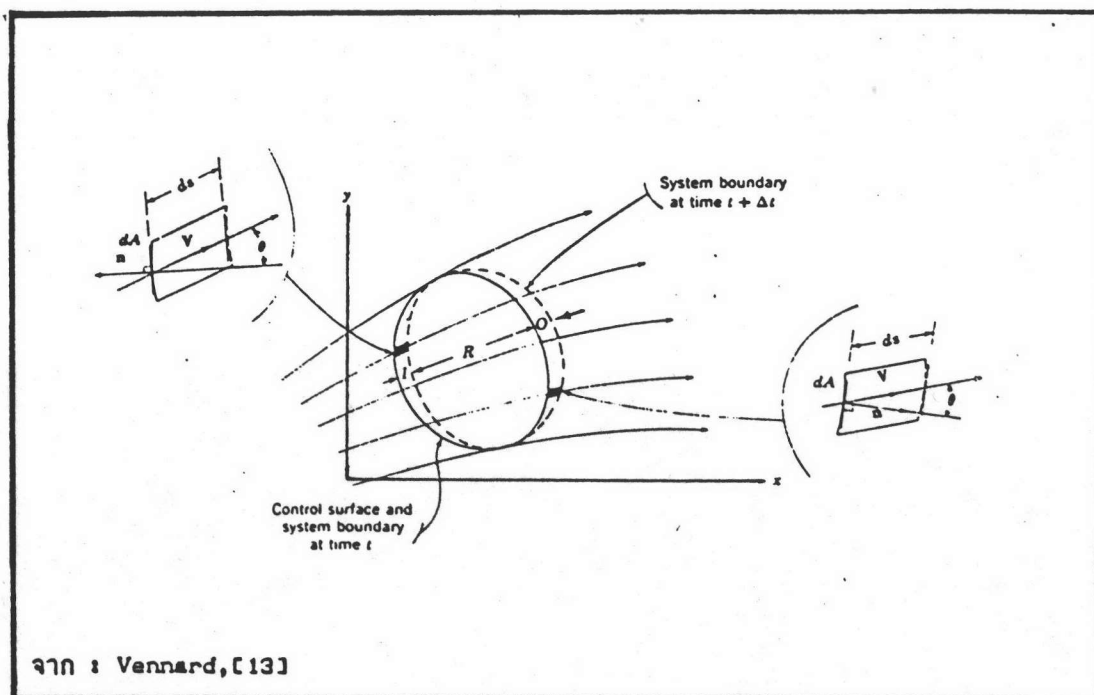
มวลของของไหลที่ไหลผ่านหน้าตัด (1) ในช่วงเวลา dt จะเท่ากับมวลของของไหลที่ไหลผ่านหน้าตัด (2) ในช่วงเวลา dt ซึ่งมาจากคำจำกัดความการไหลแบบคงที่ (Steady flow) ก็จะได้สมการความต่อเนื่องดังนี้

$$\text{ค่า } \rho V = \text{ค่าคงที่}, d(\rho V) = 0, \text{ หรือ } dA/A + dP/\rho + dV/V = 0 \quad \dots\dots(3.2.7)$$

โดยการคูณสมการ (3.2.7) ด้วยค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก



รูปที่ (3-12) การวิเคราะห์สมการความต่อเนื่องโดยใช้ปริมาตรควบคุมในหนึ่งมิติ



รูปที่ (3-13) การวิเคราะห์สมการความต่อเนื่องโดยใช้ปริมาตรควบคุมในสองมิติ

$$G = \dot{m} = A_1 \gamma_1 V_1 = A_2 \gamma_2 V_2 \dots\dots\dots(3.2.8)$$

สำหรับของเหลวและก๊าซ ที่มีการไหลโดยไม่มีการผันแปรของความหนาแน่น สมการความต่อเนื่องก็สามารถเขียนได้ง่าย ๆ เป็น

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots\dots\dots(3.2.9)$$

แสดงให้เห็นว่าสำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นคงที่และอยู่ในปริมาตรควบคุมอันเดียวกัน ผลคูณของความเร็วจนพื้นที่หน้าตัดของปริมาตรควบคุมแต่ละพื้นที่จะมีค่าคงที่ตลอด สำหรับการไหลแบบคงที่

สำหรับการพิจารณาในการไหลใน 2 มิติ สมการความต่อเนื่องสามารถเขียนออกมาได้ โดยการพิจารณาปริมาตรควบคุมทั่ว ๆ ไป แล้วทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการไหลในหนึ่งมิติ

พิจารณาการไหลในปริมาตรควบคุมในรูปที่ (3-13) เป็นระบบอันหนึ่ง ซึ่งของไหลภายในปริมาตรควบคุมที่เวลา t ไหลออกจากปริมาตรควบคุมเข้าไปในโซน 0 และมีของไหลส่วนใหม่ไหลเข้าไปแทนที่ในโซน 1 ส่วนของระบบก็ยังคงอยู่ภายใต้ปริมาตรควบคุมในโซน R จากกฎการคงตัวของมวล

$$(m_1 + m_R)_t = (m_R + m_0)_t + dm$$

และสำหรับการไหลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา $(m_R)_t = (m_R)_t + dm$ ดังนั้น

$$(m_1)_t = (m_0)_t + dm$$

มวลใน 0 ก็คือการอินทิเกรตของมวลที่เคลื่อนออกตลอดแนวของส่วนของพื้นที่ dA ของพื้นผิวควบคุม (Control surface) ในช่วงเวลา dt (ดูจากรูป)

เพราะว่าปริมาตรของปริซึมส่วนเล็ก ๆ ซึ่งเป็นผลคูณของพื้นที่ $(dA = 1 \cdot d1$ เมื่อความยาวของ differential segment ของพื้นผิวควบคุม และแผ่นความหนาของการไหลหนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบของการไหลที่ใช้) ของฐานและความสูงของมัน ระยะทางที่ขอบเขตของระบบ

เคลื่อนไปตามเส้นกระแส $dS = V dt$ ดังนั้น

$$(m_o)_{t+dt} = \int_{c.s.out} \rho(V \cos \theta) dA dt \quad \dots\dots\dots(3.2.10)$$

3.2.5 หลักการของอิมพัลส์และโมเมนตัม

สมการออยเลอร์ ซึ่งได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2.1 โดยการประยุกต์ในรูปของปริมาณสเกลาร์ (Scalar) ของกฎข้อที่สองของนิวตัน อย่างไรก็ตาม กฎของนิวตันเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณเวกเตอร์ (Vectors) และสามารถเขียนในรูปของส่วนของของเหลวหรืออนุภาคในเทอมของอิมพัลส์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำต่ออนุภาคของของเหลว เช่น แรงเฉือน, ความดัน, แรงเนื่องจากความโน้มถ่วงโลก, และอื่น ๆ และผลจากการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงเส้นของระบบก็คือ

$$\left(\sum F\right) dt = d(mV_c) \quad \text{or} \quad \sum F = \frac{d}{dt}(mV_c) \quad \dots\dots\dots(3.2.11)$$

เมื่อ V_c = ความเร็วของจุดศูนย์กลางของมวลในระบบ (Center of Mass) ซึ่งปริมาณ mV_c คือปริมาณโมเมนตัมเชิงเส้นของระบบ และ $(F) dt$ ก็คือ อิมพัลส์ในช่วงเวลา dt

ถ้าหากแรงที่กระทำต่อระบบทำให้เกิดแรงบิดสุทธิ (Net Torque), T แรงบิดอิมพัลส์ (Torque Impulse) ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในปริมาณของโมเมนตัมเชิงมุม (Angular Momentum) หรือโมเมนต์ของโมเมนตัม (Moment of Momentum) ตามกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$T = \sum (r \times F) = \frac{d}{dt}(r \times mV_c) \quad \dots\dots\dots(3.2.12)$$

เมื่อ r คือเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลาง O ของพิกัดที่คงที่ของระบบไปยังจุดที่มีแรงมากระทำ หรือจุดศูนย์กลางของมวล

3.2.6 การนำเอาหลักการปริมาตรควบคุมในการวิเคราะห์การไหล

พิจารณาการไหลแบบคงที่ผ่านวัตถุแกร่งบางอย่าง เช่น ใบพัดในเครื่องสูบลม และปริมาตร

ควบคุมที่เกิดขึ้นดังรูป (3-14)

โดยของไหลที่พิจารณาเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ (Real Compressible Fluid) จากการไหลตามรูปที่ (3-14) สมการ (3.2.11) สามารถเขียนได้เป็น

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{V}_c) = \frac{d}{dt}\left(\int_{\text{SYS}} \mathbf{V} dm\right)$$

เมื่อทำการอินทิเกรต ตลอดของส่วนของมวล dm ในระบบ จากรูป (3-14) จะได้

$$\frac{d}{dt}\left(\int_{\text{SYS}} \mathbf{V} dm\right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left\{ \frac{\left(\int_{\text{SYS}} \mathbf{V} dm\right)_{t+\Delta t} - \left(\int_{\text{SYS}} \mathbf{V} dm\right)_t}{\Delta t} \right\}$$

และ, เพราะว่าโมเมนต์ตัมในขอบเขตของ R ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการไหลคงที่

$$\begin{aligned} \left(\int_{\text{SYS}} \mathbf{V} dm\right)_{t+\Delta t} &= \int_R \mathbf{V} dm + \int_O \mathbf{V} dm \\ \left(\int_{\text{SYS}} \mathbf{V} dm\right)_t &= \int_R \mathbf{V} dm + \int_I \mathbf{V} dm \end{aligned}$$

จาก Continuity Derivation ในหัวข้อ 3.2.2 สำหรับโซน O (ในรูป 3-14)

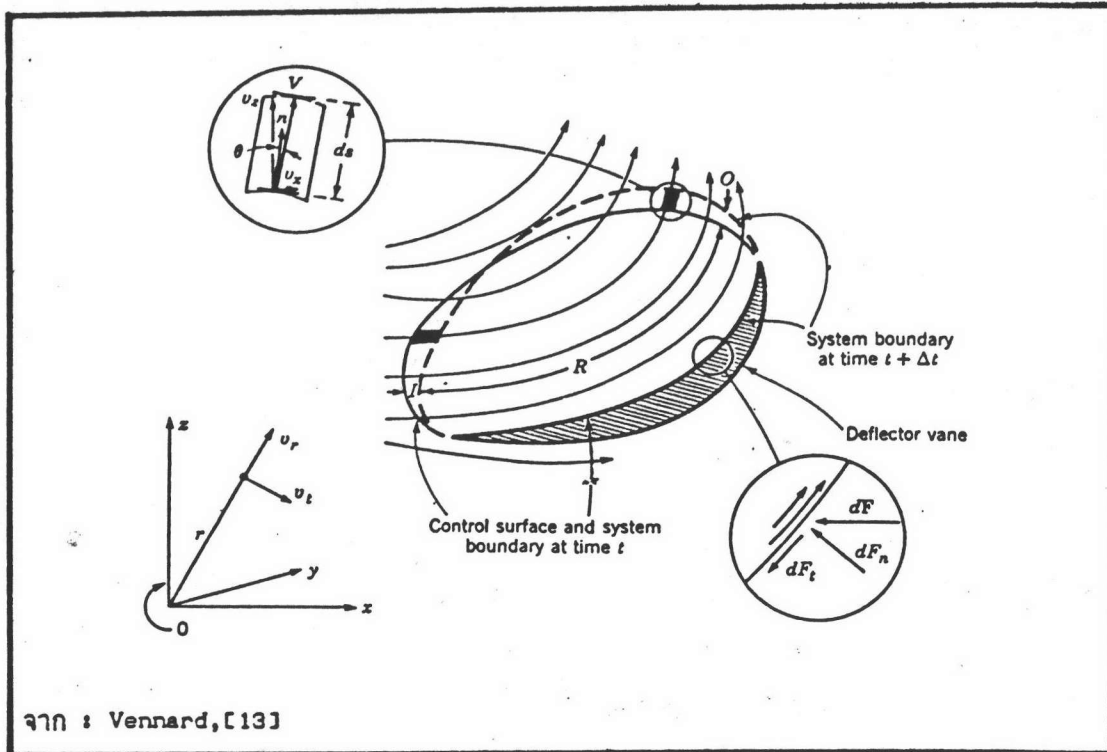
จะได้

$$\begin{aligned} dm &= \rho dA \Delta S \cos \theta = \rho dA V \cos \theta \Delta t \\ &= \rho V \cdot n dA \Delta t = \rho V \cdot dA \Delta t \end{aligned}$$

จะได้

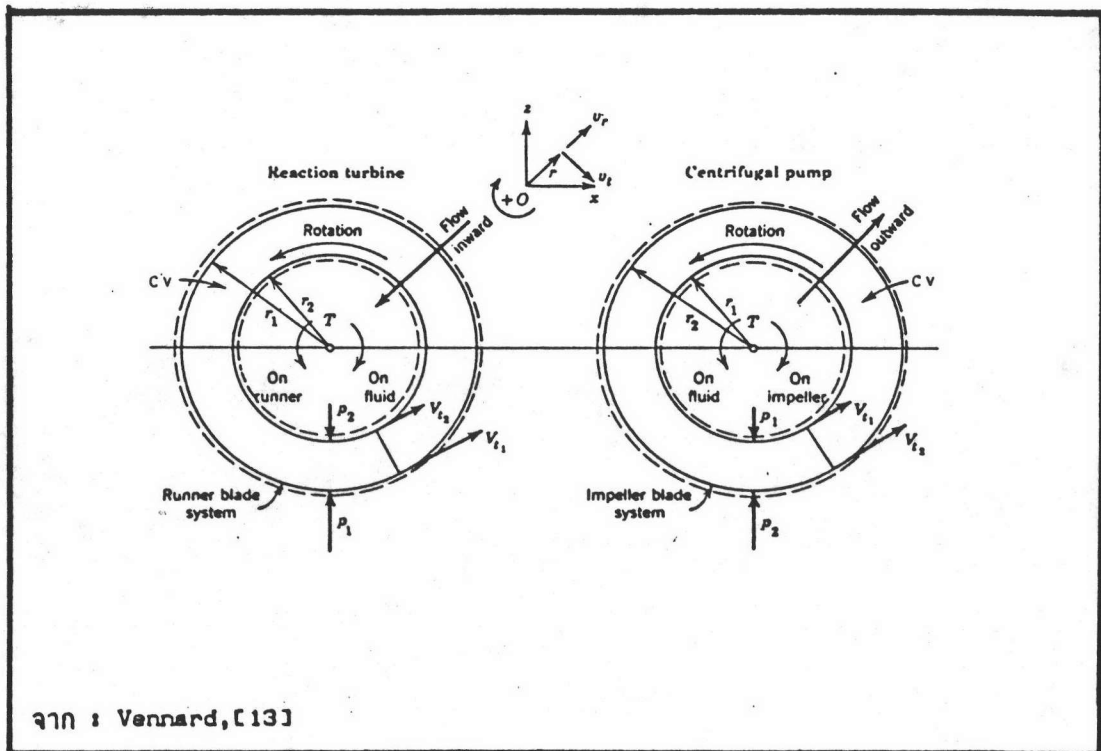
$$\int_O \mathbf{V} dm = \Delta t \int_{\text{C.S. out}} \mathbf{V} (\rho \mathbf{V} \cdot dA)$$

ทำนองเดียวกัน



จาก : Vennard, [13]

รูปที่ (3-14) การวิเคราะห์สมการโมเมนต์ตัมโดยใช้ปริมาตรควบคุม



จาก : Vennard, [13]

รูปที่ (3-15) ลักษณะการทำงานของ เทอร์ไบน์ และ เครื่องสูบน้ำ

$$\int_V \mathbf{V} dm = \Delta t \left[- \int_{C.S.IN} \mathbf{V} (\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) \right]$$

และ

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\int_{SYS} \mathbf{V} dm \right) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left\{ \left(\int_{C.S.OUT} \mathbf{V} (\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) + \int_{C.S.IN} \mathbf{V} (\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) \right) \frac{\Delta t}{\Delta t} \right\} \\ &= \oint_{C.S.} \mathbf{V} (\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) \end{aligned}$$

ในขอบเขตจำกัด (limit) เมื่อ $\Delta t \rightarrow 0$ ผลของแรงภายนอกที่มากกระทำต่อระบบจะมีค่าเท่ากับผลรวมทั้งหมดของแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม เพราะฉะนั้นสำหรับปริมาตรควบคุมภายใต้การไหลคงที่จะได้

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{F} &= \oint_{C.S.} \mathbf{V} (\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) = \oint_{C.S.} \mathbf{V} (\rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dA) \\ &= \oint_{C.S.} \mathbf{V} dm \quad \dots\dots\dots (3.2.13) \end{aligned}$$

เมื่อ $dm = \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = V_n dA = dQ$ เป็นอัตราการไหลของมวล (kg/s) ออกจากปริมาตรควบคุมผ่านพื้นที่ที่กำหนด dA ค่าของ $V dm$ คือ พลังค์ของโมเมนตัม (kg.m/s² = N)

เมื่อ (F_x, V_x) และ (F_z, V_z) เป็นแรงและความเร็วที่พิจารณาในแนวแกน X และ Z สมการ (2.12) สามารถเขียนในรูปของ

$$\sum F_x = \oint_{C.S.} V_x dm = \oint_{C.S.} V_x (\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) \quad \dots\dots (3.2.14 ก)$$

และ $\sum F_z = \oint_{C.S.} V_z dm = \oint_{C.S.} V_z (\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) \quad \dots\dots (3.2.14 ข)$

สำหรับในการนิยามของโมเมนตัมของโมเมนตัม (Moment of Momentum)

$$T = \sum (\mathbf{r} \times \mathbf{F}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{\text{SYS}} \mathbf{r} \times \mathbf{V} \, dm \right)$$

สำหรับปริมาตรควบคุมที่กำหนด

$$T = \sum (\mathbf{r} \times \mathbf{F}) = \oint_{\text{C.S.}} (\mathbf{r} \times \mathbf{V})(\rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}) = \oint_{\text{C.S.}} (\mathbf{r} \times \mathbf{V}) \, d\dot{m} \quad \dots (3.2.15)$$

เมื่อ $d\dot{m} > 0$ การไหลจะไหลออกจากปริมาตรควบคุม การไหลในระนาบจะไหลด้วยแรงและความเร็วในแนวซึ่งกำหนดขึ้น คือในแนวของรัศมีและแนวเส้นสัมผัสเท่านั้น

3.2.7 การประยุกต์สมการพลังงานและหลักการของอิมพัลส์และโมเมนตัม

จากสมการของเบอร์นูลี หากมีการบวกพลังงานเชิงกล (Mechanical Energy, E) เช่นการไหลของของไหลผ่านเครื่องสูบน้ำ หรือเทอร์ไบน์ สมการเบอร์นูลีอาจเขียนได้เป็น

$$P_1/\gamma + V_1^2/2g + Z_1 + E = P_2/\gamma + V_2^2/2g + Z_2 \quad \dots (3.2.16)$$

ปริมาณ E ที่อยู่ในเทอมของพลังงานที่บวกเข้าไปต่อหน่วยน้ำหนักของของไหลที่ไหลผ่าน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพลังงานในทันทีทันใด โดยทั่วไปวิศวกรมีความต้องการเพื่อกำหนดขนาดกำลังงานที่จะให้แก่ระบบโดยอาจคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลของน้ำหนัก (Weight Flow Rate) และค่า E ซึ่งจะให้ค่าพลังงานรวมทั้งหมดที่ต้องการ

$$\text{กำลังงานกลของเครื่องจักรกลศาสตร์ (กิโลวัตต์)} = Q\gamma E/1000 \quad \dots (3.2.17)$$

เมื่อ Q คือค่าอัตราการไหล (ลบ.ม./วินาที) γ คือค่าน้ำหนักจำเพาะของน้ำ และ E คือค่าหัวพลังงานรวมของเครื่องจักรกลศาสตร์ จากสมการ (3.2.16) และสมการ (3.2.17) เมื่อทราบเงื่อนไขในการสูบน้ำคือ ความดัน, ความสูงที่ต้องการ, ขนาดของท่อ และอัตราการไหลที่ต้องการ ก็สามารถรู้ขนาดของเครื่องสูบน้ำและต้นกำลังได้อย่างคร่าว ๆ

สำหรับการประยุกต์หลักการอิมพัลส์และโมเมนต์ตัม นับว่ามีความสำคัญมาก การใช้หลักการดังกล่าวนี้ในการออกแบบเครื่องสูบน้ำ (Pump), เทอร์ไบน์ (Turbine) หรือ เครื่องยนต์เทอร์โบอื่น ๆ (Turbo Machines) สามารถใช้ได้กับการไหลที่ซับซ้อนในการไหลแบบสามมิติ (Complex Three-Dimensional Flow Field)

จากรูปที่ (3-15) ได้แสดงถึงลักษณะการทำงานของเทอร์ไบน์ และเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งอย่างคร่าวๆ ซึ่งประกอบชุดของแผ่นรับแรงกระแทกจากของไหล (blade) ซึ่งหมุนรอบแกนของการหมุนอันหนึ่ง สำหรับระบบของแผ่นรับแรงกระแทกนี้ นับเป็นส่วนสำคัญสำหรับเครื่องยนต์ที่มีการหมุน สำหรับในตัวเทอร์ไบน์เรียกว่า รันเนอร์ (Runner) ส่วนในปั๊มจะเรียกว่า ใบพัด (Impeller) เมื่อของไหลไหลผ่านไปบนแผ่นรับแรงกระแทกเหล่านี้ เวกเตอร์ความเร็วสมบูรณ์ในส่วนที่เปลี่ยนแปลงในแนวเส้นสัมผัสของการหมุนจะลดลง เมื่อไหลผ่านไปยังรันเนอร์ของเทอร์ไบน์ แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านไปยังใบพัดของเครื่องสูบน้ำ ถ้าหากสร้างพื้นที่ควบคุมขึ้นที่ขอบของระบบของแผ่นรับแรงกระแทก ที่หน้าตัด (1) จะเป็นส่วนของทางเข้าของของไหล และที่หน้าตัดที่ (2) เป็นส่วนของทางออกของของไหล สำหรับปริมาตรควบคุมสำหรับเทอร์ไบน์และเครื่องสูบน้ำ หลักการของอิมพัลส์และโมเมนต์ตัมสามารถนำมาประยุกต์ได้ โดยการแยกความเร็วของการไหลออกเป็นสองส่วน คือความเร็วในแนวสัมผัสและแนวรัศมี $\oint_{c.s.} (v_r) dm$ สามารถคำนวณได้โดยง่าย เพราะว่าความเร็วในแนวรัศมี (Radial Component of Velocity) ผ่านจุดศูนย์กลางของโมเมนต์ (Center of Moment) เพราะฉะนั้นผลของการอินทิเกรตตลอดพื้นผิวควบคุมจะได้

$$\oint_{c.s.} (rv_r) dm = (-V_{r2}r_2 + V_{r1}r_1)Q\rho \quad \dots\dots\dots(3.2.18)$$

หรือ
$$T = -[V_{r2}r_2 - V_{r1}r_1]Q\rho \quad \dots\dots\dots(3.2.19)$$

โดยที่ $P = T\omega$ โดย ω = ความเร็วเชิงมุมของการหมุน และ $P = Q\mathcal{E}$ (E_u หรือ E_c)

$$E = \frac{\omega}{g_s}[V_{r1}r_1 - V_{r2}r_2] \quad \dots\dots\dots(3.2.20)$$

สำหรับเครื่องสูบน้ำค่า $v_{r2}r_2 > v_{r1}r_1$ ดังนั้นสมการ (2.20) จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$E_p = \frac{\omega}{g} [V_2 r_2 - V_1 r_1] \dots\dots\dots (3.2.21)$$

ค่า E_p นี้เรียกว่า "ค่าหัวพลังงานรวมของเครื่องสูบน้ำ" ซึ่งค่า E_p อันนี้ได้นำไปใช้ในการพิจารณาขนาดของเครื่องสูบน้ำและขนาดของเครื่องต้นกำลัง โดยประกอบกับการประยุกต์เอาสมการเบอร์นูลลี ดังที่ได้กล่าวมาในสมการ (3.2.16) ซึ่งต้องทราบสภาพของอัตราการไหล และหัวพลังงานทั้งหมดที่ต้องการ

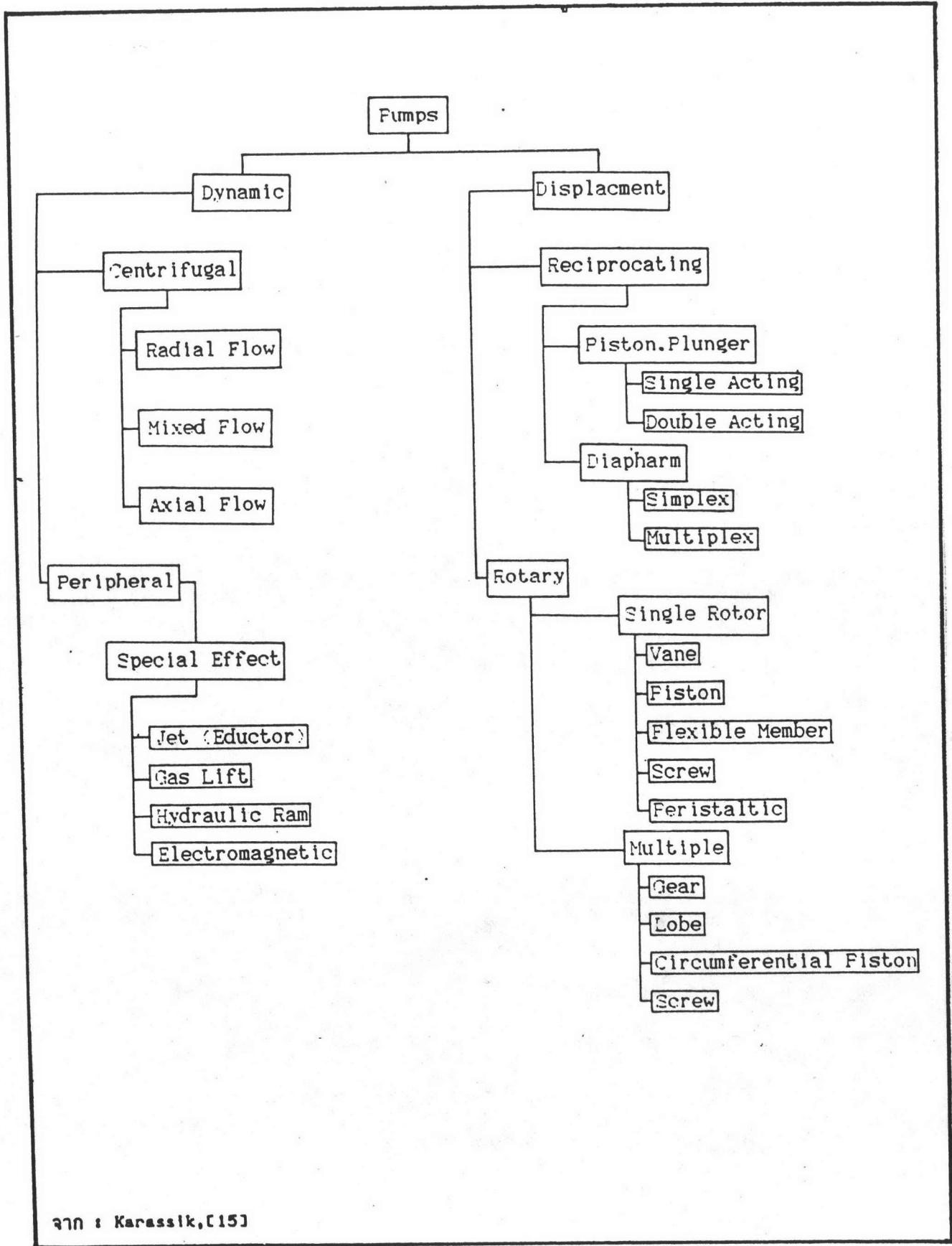
สมการ (3.2.21) แสดงข้อมูลในการคำนวณค่าหัวพลังงานรวมของเครื่องสูบน้ำ โดยที่ ω = ความเร็วเชิงมุมเครื่องสูบน้ำ V_2, V_1 เป็นความเร็วของของเหลวในแนวเส้นสัมผัสที่ตำแหน่งหน้าตัด 2 และ 1 ตามลำดับ r_2, r_1 เป็นรัศมีของใบพัดที่ขอบนอกและขอบในของใบพัด วัดจากจุดศูนย์กลางของตัวปั๊มสำหรับค่า V_2, V_1, r_2 และ r_1 เป็นข้อมูลที่ทางบริษัทผู้ผลิตเป็นผู้กำหนด ซึ่งเป็นเทคนิคในการออกแบบของแต่ละผู้ผลิต

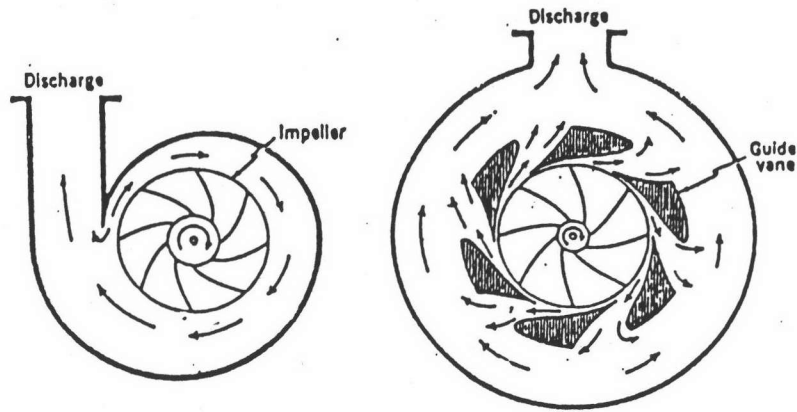
3.2.8 ประเภทและชนิดของเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการนำน้ำจากที่ที่มีพลังงานต่ำไปสู่ที่ที่มีพลังงานสูง โดยการใช้กำลังงานกลจากภายนอก เครื่องสูบน้ำในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด การผลิตเครื่องสูบน้ำเพื่อให้ใช้งานจะมีวัตถุประสงค์และความจำเป็นที่แตกต่างกันออกไป แล้วแต่ความต้องการและความเหมาะสมกับประเภทของงาน การจำแนกประเภทและชนิดของเครื่องสูบน้ำอาจจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆดังนี้คือ

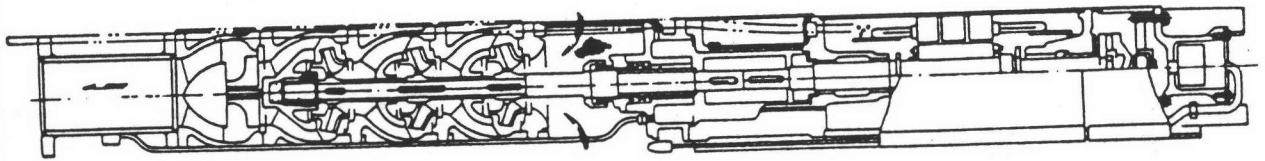
1) เครื่องสูบน้ำที่ใช้หลักการการเหวี่ยงน้ำทางพลศาสตร์ เครื่องสูบน้ำประเภทเหล่านี้ยังแยกออกเป็นประเภทย่อยๆได้อีก 2 แบบคือเครื่องสูบน้ำชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump หรือ Turbo Pump) เครื่องสูบน้ำชนิดนี้จะใช้กำลังงานกลจากภายนอกไปขับตัวใบพัดภายในเลื้อสูบน้ำทำให้เกิดการหมุน ซึ่งตัวใบพัดจะส่งถ่ายกำลังงานดังกล่าวให้แก่มวลของน้ำที่อยู่รอบตัวใบพัด การไหลผ่านของเหลวผ่านเครื่องสูบน้ำจะมีหลายลักษณะได้แก่ การไหลออกจากศูนย์กลางออกไปในแนวรัศมี (Radial Flow Pump) เครื่องสูบน้ำแบบนี้นิยมใช้กันมาก เพราะมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง และมีค่าความเร็วจำเพาะต่ำ เครื่องสูบน้ำที่มีการไหลตามแนวแกนของการหมุน (Axial Flow Pump) ที่ทิศทางการไหลจะไหลไปตามแนวแกนของการหมุนของเครื่องสูบน้ำ เครื่องสูบน้ำแบบนี้จะเหมาะสำหรับการสูบน้ำที่อัตราการไหลสูงแต่มีค่าหัวพลังงานต่ำ โดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพต่ำ และมีค่าความเร็ว

ตารางที่ (3-4) แผนภูมิแสดงการแยกประเภทของเครื่องสูบน้ำ

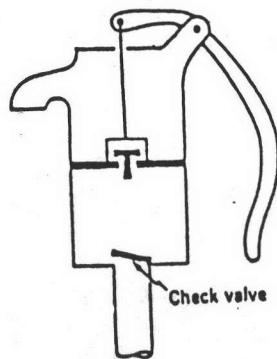




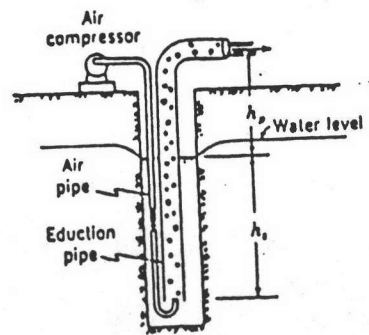
(ก) เครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ชนิดหอยโข่ง และชนิดเทอร์ไบน์



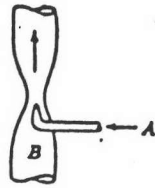
(ข) เครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มีใบพัดหลายตอน ใช้สำหรับบ่อน้ำลึก



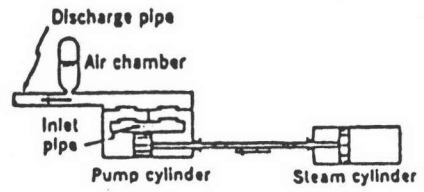
(ค) เครื่องสูบน้ำแบบมือโยก



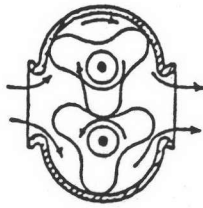
(ง) เครื่องสูบน้ำที่ใช้พองอากาศ



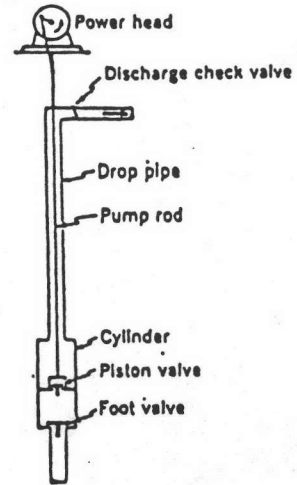
(ก) เครื่องสูบน้ำแบบเว้ต ใช้น้ำเป็นตั้ เหนี่ยววน้ำ



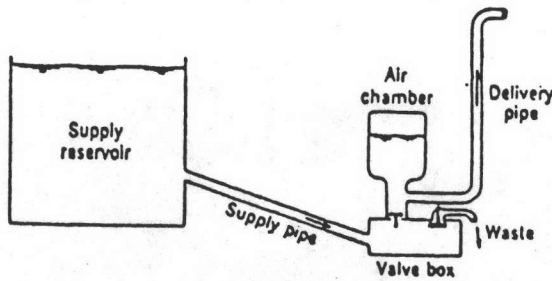
(ข) เครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบ



(ค) เครื่องสูบน้ำแบบโรตารี

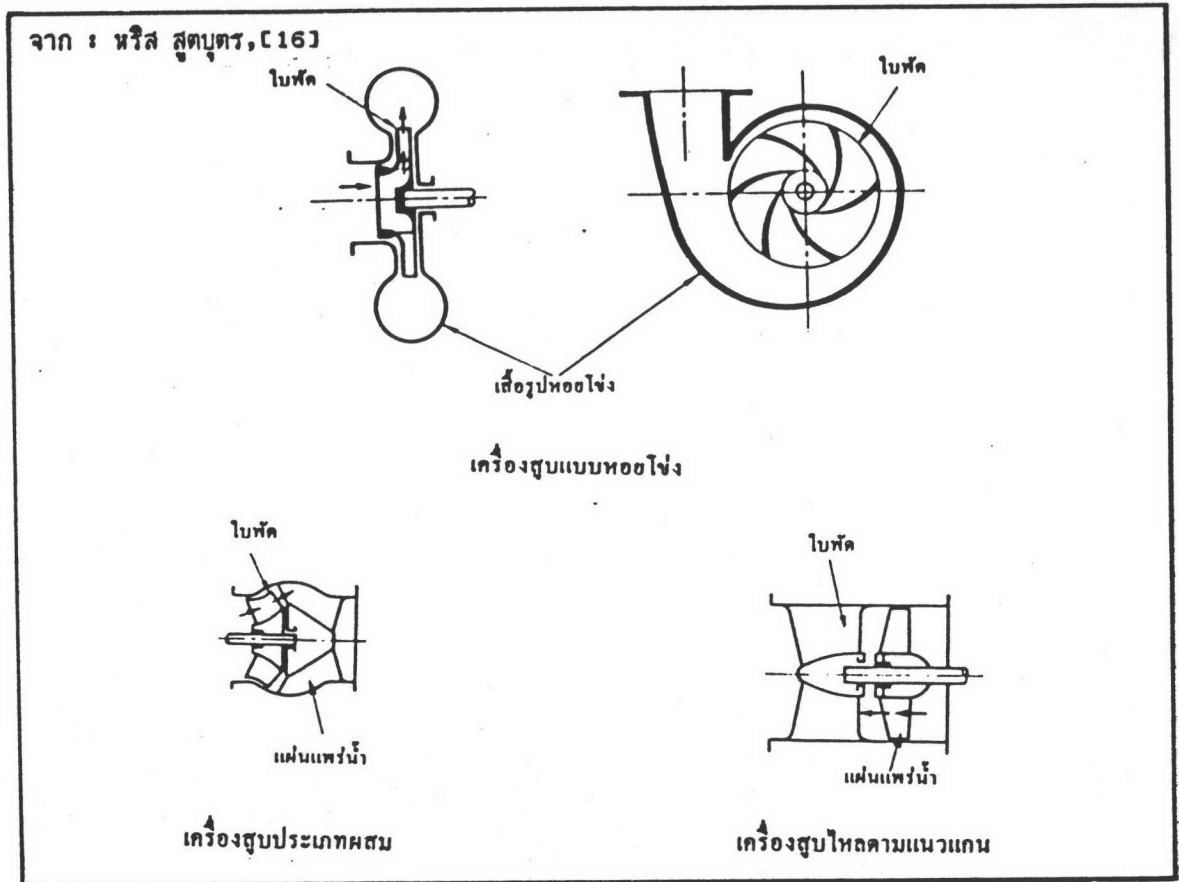


(ง) เครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบที่ใช้สำหรับบ่อน้ำลึก

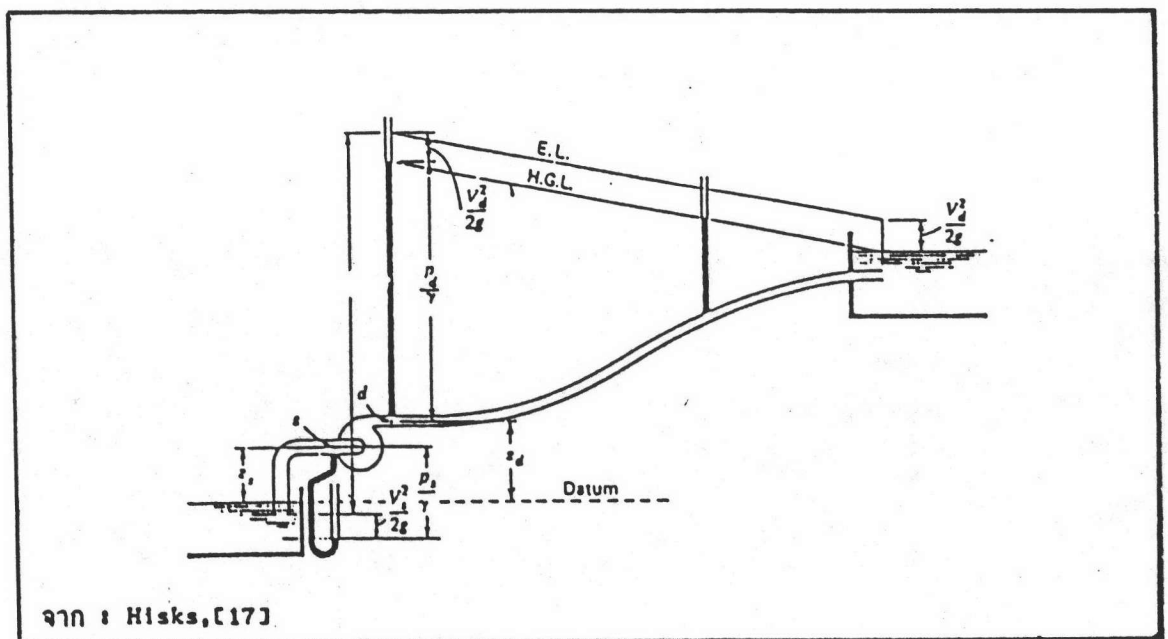


(จ) ตะบันน้ำ (Hydraulic Ram)

รูปที่ (3-16 ต่อ) ลักษณะภายในของเครื่องสูบน้ำชนิดต่างๆ



รูปที่ (3-17) ลักษณะของตัวใบพัดของเครื่องสูบบแบบหอยโข่ง (Volute Pump) เครื่องสูบบแบบการไหลผสม (Mixed Flow Pump) และเครื่องสูบบแบบไหลตามแนวแกนของการหมุน (Axial Flow Pump)



จาก : Hisks, [17]

รูปที่ (3-18) ลักษณะทางชลศาสตร์ของการไหลผ่านในท่อผ่านเครื่องสูบน้ำ

จำเพาะสูง ส่วนอีกแบบหนึ่งจะเป็นการไหลแบบผสม (Mixed Flow Pump) เครื่องสูบบแบบนี้จะมีแนวคิดทางการไหลผสมกันระหว่างการไหลในแนวรัศมี และการไหลในแนวแกน เครื่องสูบประเภทนี้จะมีค่าความเร็วจำเพาะปานกลาง เครื่องสูบบแบบนี้ยังมีลักษณะที่แยกย่อยออกไปตามลักษณะของตัวใบพัดลักษณะของตัวเลื้อสูบ ลักษณะของท่อดูด จำนวนตอนของเครื่องสูบ และลักษณะการใช้งานดังแสดงในรูปที่ (3 - 16) เครื่องสูบอีกประเภทหนึ่งเป็นเครื่องสูบที่อาศัยการเหนี่ยวนำของของไหลที่มีความเร็วมาก เป็นตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำภายในท่อ เครื่องสูบประเภทเหล่านี้ ได้แก่ เครื่องสูบบแบบเจ็ต เครื่องสูบบแบบใช้ฟองอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำ และเครื่องตะบันน้ำ เป็นต้น

2) เครื่องสูบที่ใช้หลักการแทนที่ของสสาร (Displacement) เครื่องสูบประเภทเหล่านี้ ได้แก่ เครื่องสูบน้ำแบบลูกสูบ (Reciprocating Pump) เครื่องสูบน้ำแบบสว่าน (Screw Pump) เครื่องสูบน้ำแบบโรตารี (Rotary Pump) และเครื่องสูบที่อาศัยแผ่นไดอะแฟรมในการแทนที่ เป็นต้น รูปที่ (3-16) ได้แสดงลักษณะของเครื่องสูบบแบบต่างๆดังที่กล่าวมา

3.2.9 เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

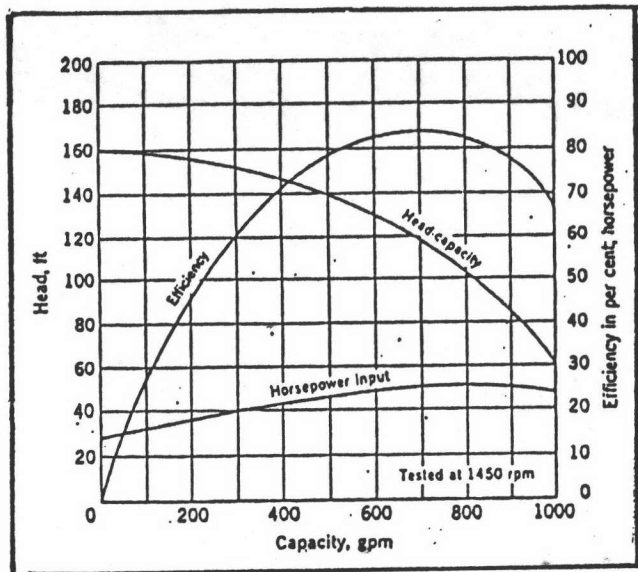
ในการพิจารณาการใช้เครื่องสูบน้ำ โดยทั่วไปจะพิจารณาจากเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำโดยเส้นโค้งดังกล่าวจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของสิ่งที่สำคัญดังต่อไปนี้ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหัวพลังงานของรวมของเครื่องสูบ ประสิทธิภาพของเครื่องสูบ และกำลังงานที่ใช้ในการขับเครื่องสูบน้ำ กับค่าอัตราการไหล

เครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จะมีช่วงการทำงานที่กว้างมากทั้งนี้จะสังเกตได้จากเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหัวพลังงานของเครื่องสูบ กับค่าอัตราการไหล รูปที่ 3 - 20 (ก) - (จ) ได้แสดงลักษณะโค้งความสัมพันธ์ดังกล่าวในลักษณะต่างๆดังนี้

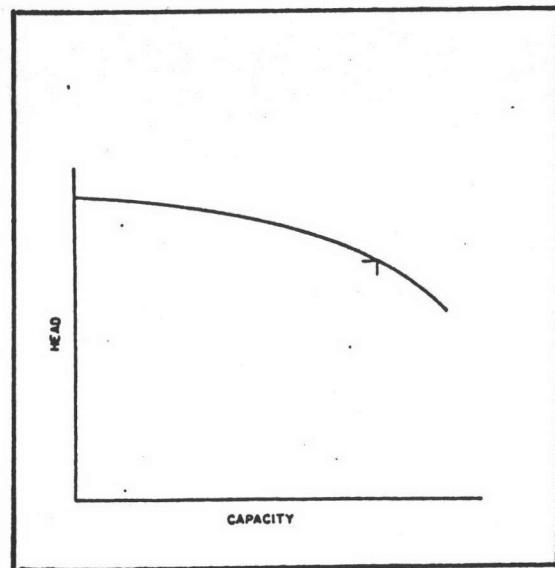
รูปที่ (3 - 20 ก) แสดงการลดลงโดยตลอดของค่าหัวพลังงาน เมื่อค่าอัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น (Rising Characteristic) เครื่องสูบบแบบนี้จะมีลักษณะการทำงานที่เสถียร การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล จะค่อยๆเปลี่ยนแปลงตามค่าหัวพลังงานรวมของระบบที่เปลี่ยนแปลง

รูปที่ (3 - 20 ข) แสดงลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าหัวพลังงาน เมื่ออัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นในตอนเริ่มแรก และต่อมาจะมีค่าลดลงโดยตลอด (Drooping Characteristic)

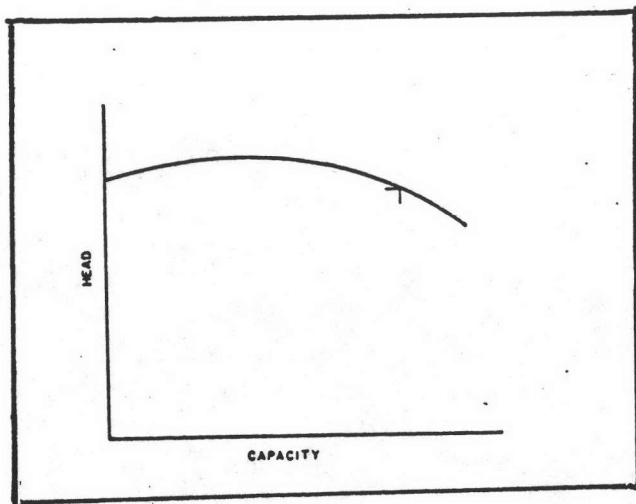
รูปที่ (3 - 20 ค) แสดงลักษณะโค้งที่มีการลดลงของหัวพลังงานลงอย่างรวดเร็ว เมื่อค่าอัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น (Steep Characteristic)



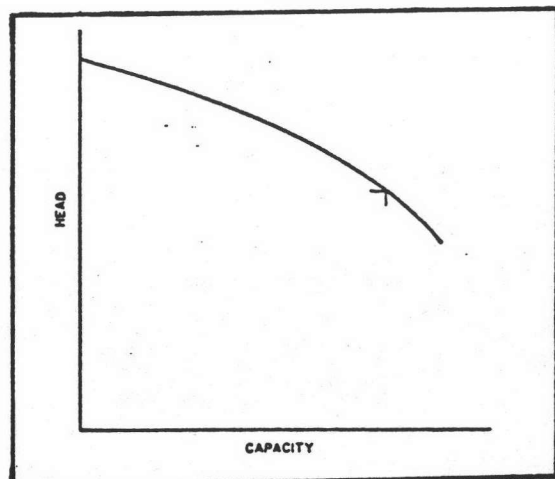
รูปที่ (3-19) เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำแบบ
หอยโข่งที่ความเร็วรอบ 1450 รอบ/นาที



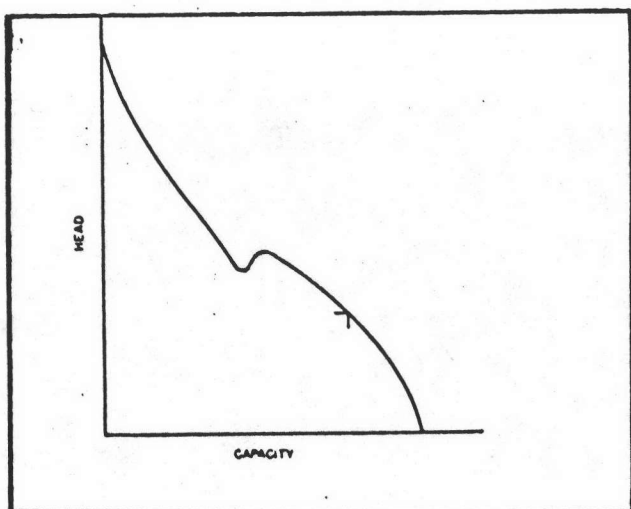
รูปที่ (3-20 ก) Rising Characteristic



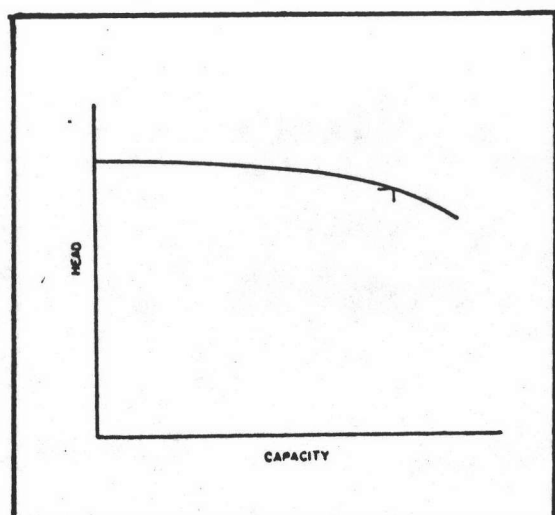
รูปที่ (3-20 ข) Drooping Characteristic



รูปที่ (3-20 ค) Steep Characteristic



รูปที่ (3-20 จ) Unstable Characteristic



รูปที่ (3-20 ง) Flating Characteristic

รูปที่ (3 - 20 ง) แสดงโค้งลักษณะราบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหล ค่าหัวพลังงานจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (Flat Characteristic)

รูปที่ (3 - 20 จ) แสดงลักษณะของโค้งแสดงสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่ไม่เสถียร คือ มีค่าหัวพลังงานมากกว่าหนึ่งค่าที่ค่าอัตราการไหลที่แตกต่างกัน (Unstable Characteristic)

3.2.10 ความคล้ายกันของเครื่องสูบน้ำ

การผลิตเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง จะมีการออกแบบใบพัดที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไปแล้ว แต่ลักษณะการใช้งานที่จะนำไปใช้ ในการพิจารณาเครื่องสูบน้ำที่มีความคล้ายกันทางเรขาคณิตจะมีความสัมพันธ์ตามลักษณะการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ สำหรับเครื่องสูบน้ำทั่วไปค่าอัตราการไหล (Q) จะมีความเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของการไหล (A) คูณด้วยความเร็วของการไหล (V) โดย $Q = AV$ ซึ่งในเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งพื้นที่หน้าตัดของการไหลจะแปรผันตามค่ากำลังสอง ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องสูบน้ำ (D), $A \propto D^2$ และความเร็วของการไหลจะแปรผันตามความเร็วรอบของการหมุน (N) คูณด้วยขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด, $V \propto ND$ ดังนั้นค่าอัตราการไหล $Q \propto D^3 N$ ในขณะที่ค่าหัวพลังงาน (H) จะแปรผันตามค่ากำลังสองของความเร็ว (V), $H \propto V^2$ หรือ $V \propto \sqrt{H}$ ซึ่งจะได้ว่า $Q \propto D^2 H$ ดังนั้น H จะแปรผันตาม $D^3 N^2$ และเนื่องจากกำลังงานของน้ำที่ได้จากเครื่องสูบน้ำ (P) = eQH โดยที่ e คือค่าน้ำหนักจำเพาะของของเหลว และ e คือค่าประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ หรืออาจกล่าวได้ว่า $P \propto QH$ หรือ $P \propto D^5 N^3$ ซึ่งสามารถสรุปความคล้ายกันของเครื่องสูบน้ำได้ดังนี้

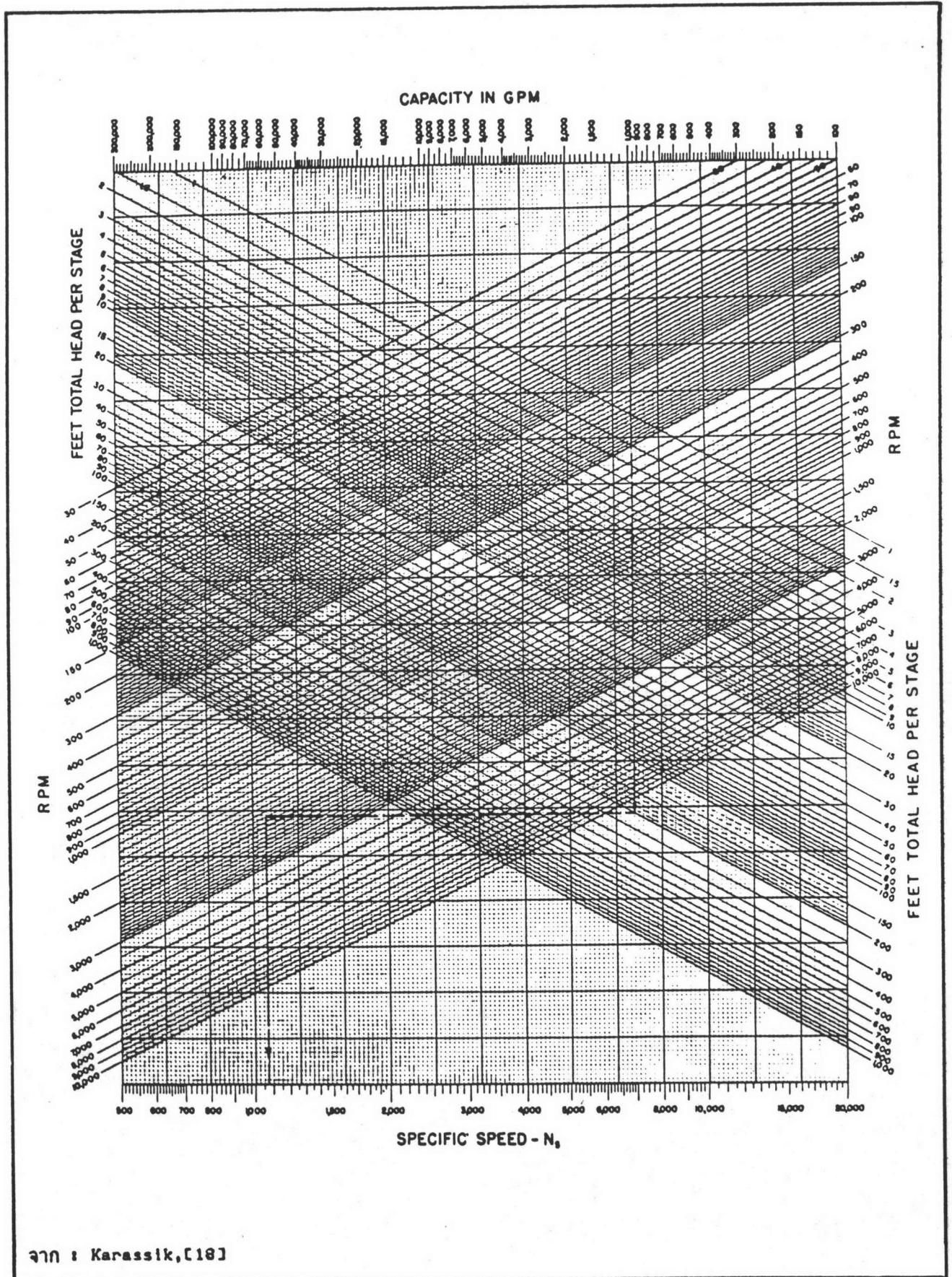
$$Q \propto D^3 N, \quad H \propto D^2 N^2, \quad P \propto D^5 N^3 \quad \dots\dots\dots(3.2.21)$$

หรือ $Q/D^3 N = K_1, \quad H/D^2 N^2 = K_2, \quad P/D^5 N^3 = K_3 \quad \dots\dots(3.2.22)$

เมื่อ K_1, K_2, K_3 คือค่าคงที่ (constant)

3.2.11 ความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำ (Specific Speed)

ในกรณีของเครื่องสูบน้ำ หากนำเอาหลักการความเหมือนกันทางเรขาคณิต มาพิจารณา



จาก : Karassik, [18]

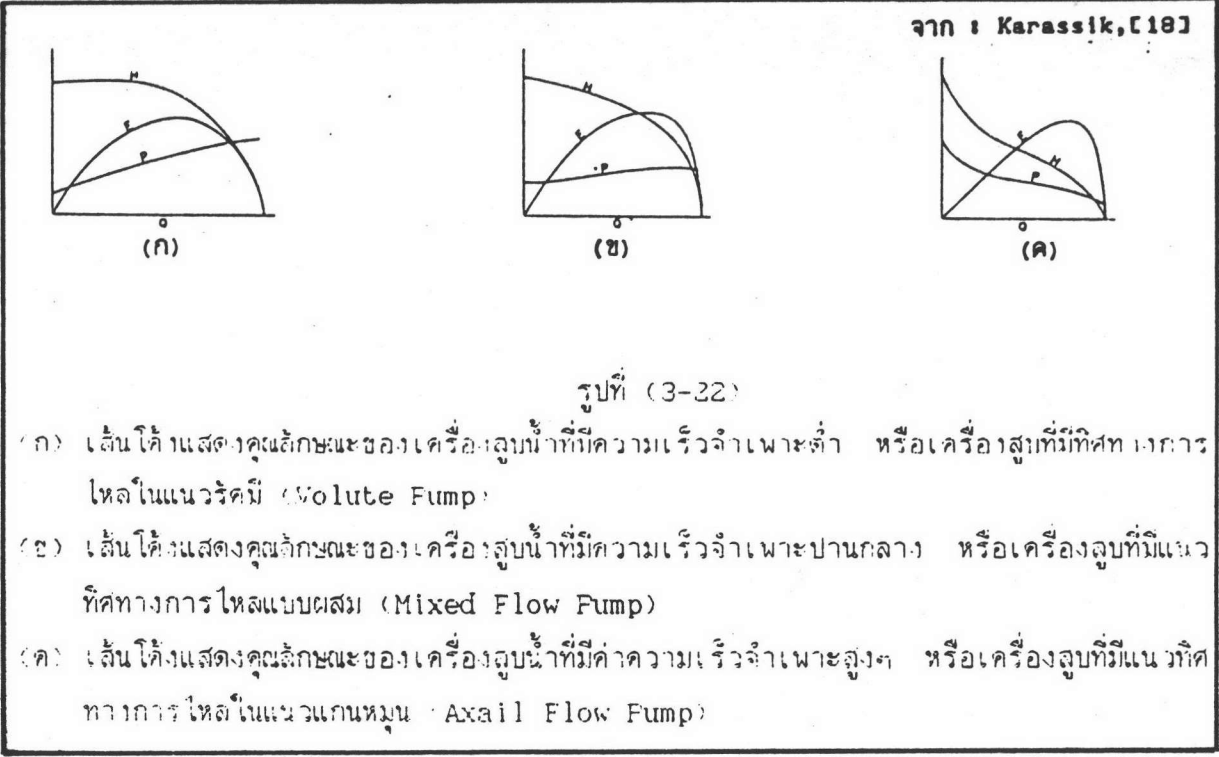
รูปที่ (3-21) ไดอะแกรมการหาค่าความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำด้วยวิธีการ

โดยยึดค่าอัตราการไหลเป็นตัวแปรอ้างอิง เนื่องจาก $P \propto QH$ ซึ่งหากแทน P ในสมการ (3.2.22) จะได้เทอมที่มีค่าคงที่สำหรับเครื่องสูบน้ำที่มีลักษณะความคล้ายกันทางเรขาคณิต ซึ่งเรียกว่า ความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำ โดยกำหนดว่า

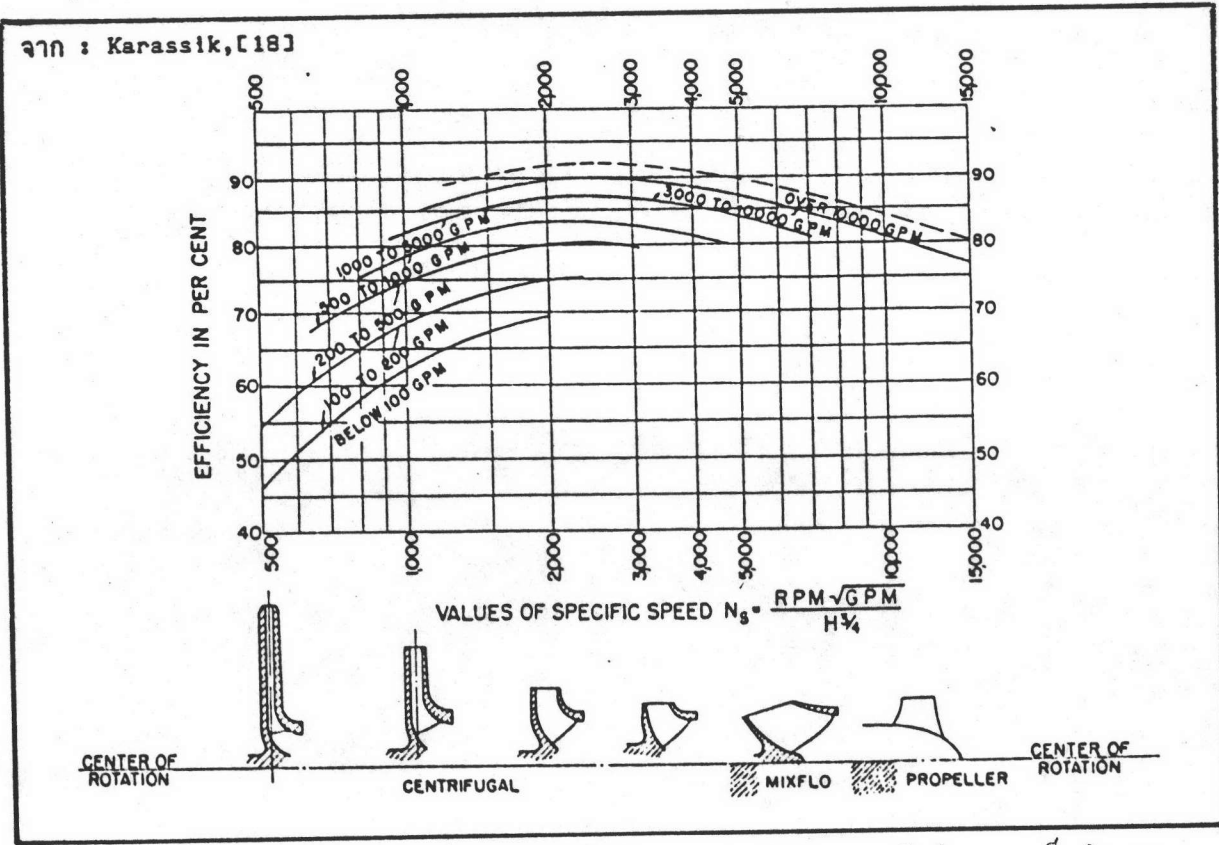
$$\text{ความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำ (Specific Speed), } N_s = NQ^{1/2}H^{-3/4} \dots (3.2.23)$$

ความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำจะคิดตามค่า Q และ H ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วรอบ (N) ที่กำหนดให้ค่าหนึ่ง รูปที่ (3 - 23) ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเร็วจำเพาะและประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยจะสังเกตได้ว่า เครื่องสูบน้ำแบบแผ่นแพร่น้ำ (เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวใบพัดมีขนาดใหญ่) และมีพื้นที่ในการไหลออกน้อยจะมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานระหว่างตัวใบพัด และ แผ่นจานของใบพัดมีมาก เครื่องสูบน้ำแบบนี้จะมีค่าความเร็วจำเพาะต่ำ แต่จะให้หัวพลังงานในการสูบน้ำสูง เครื่องสูบน้ำประเภทถัดมาดังแสดงในรูปจะมีค่าความเร็วจำเพาะสูงขึ้น แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดมีขนาดลดลง เครื่องสูบน้ำประเภทนี้จะให้ประสิทธิภาพในการสูบน้ำดีขึ้นกว่าแบบแรก เนื่องการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานของใบพัดมีน้อยลง เครื่องสูบน้ำแบบนี้จึงนิยมใช้กันมากเพราะมีประสิทธิภาพสูง เครื่องสูบน้ำประเภทต่อมาก็คือเครื่องสูบน้ำแบบผสม คือมีแนวการไหลของน้ำในทั้งสองทิศทางคือในแนวรัศมี และแนวแกนของการหมุน เครื่องสูบน้ำประเภทเริ่มมีประสิทธิภาพลดลง และจะมีค่าความเร็วจำเพาะสูงกว่าเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง เครื่องสูบน้ำประเภทสุดท้ายเป็นเครื่องสูบน้ำที่มีแนวการไหลของน้ำในแนวแกนของการหมุนเพียงอย่างเดียว เครื่องสูบน้ำประเภทนี้จะให้ค่าอัตราการไหลที่สูง แต่จะมีค่าหัวพลังงานต่ำ และมีประสิทธิภาพลดต่ำลงกว่าเครื่องสูบน้ำแบบผสมอีก

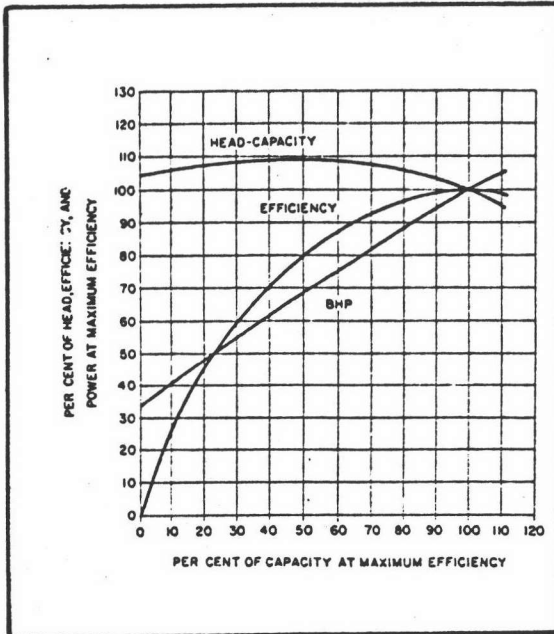
ค่าความเร็วจำเพาะจะเป็นตัวเลขที่จะบ่งบอกถึงชนิดของเครื่องสูบน้ำ โดยถ้าหากรู้ค่าความเร็วจำเพาะที่จุดประสิทธิภาพสูงสุดก็จะสามารถที่จะบ่งบอกถึงชนิดของเครื่องสูบน้ำได้เกือบสมบูรณ์ ในกรณีที่เครื่องสูบน้ำเป็นประเภทที่มีท่อคู่สองทาง ในการคิดค่าความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำจะคิดค่าอัตราการไหลเพียงครั้งเดียว สำหรับเครื่องสูบน้ำที่มีจำนวนตอนของเครื่องสูบน้ำหลายตอน (Multistage Pump) การหาค่าความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำ จะใช้ค่าหัวพลังงานที่เพิ่มขึ้นในแต่ละตอนของเครื่องสูบน้ำ รูปที่ 3-24 (ก)-(ง) ได้แสดงเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะ และสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่มีความเร็วจำเพาะต่าง ๆ กันตั้งแต่เครื่องสูบน้ำแบบแผ่นแพร่น้ำ จนถึงเครื่องสูบน้ำที่มีการไหลในแนวแกน



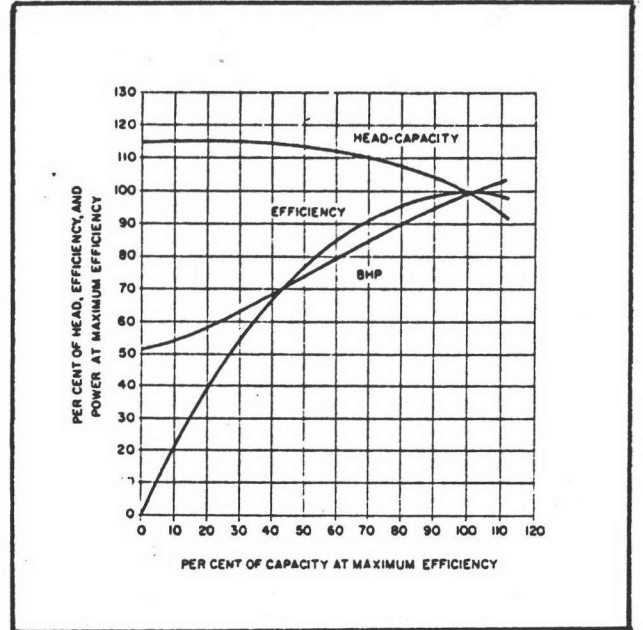
รูปที่ (3-22) ลักษณะโค้งสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่มีค่าความเร็วจำเพาะต่างๆ



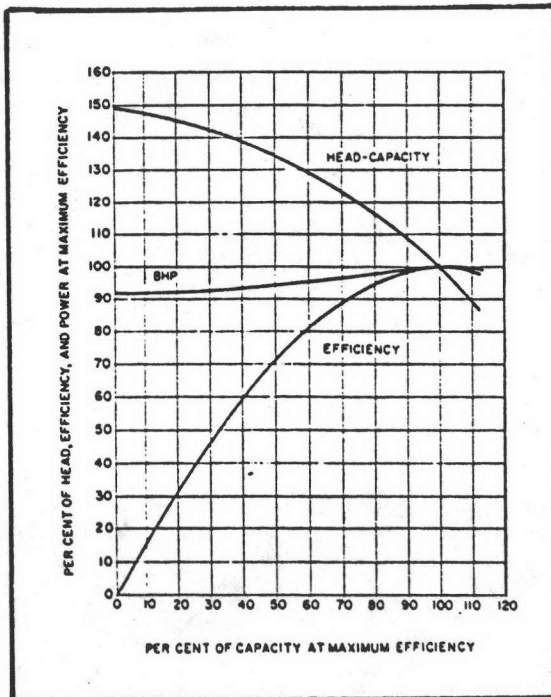
รูปที่ (3-23) ลักษณะความสัมพันธ์ของรูปร่างใบพัด และประสิทธิภาพ กับค่าความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำประเภทต่างๆ



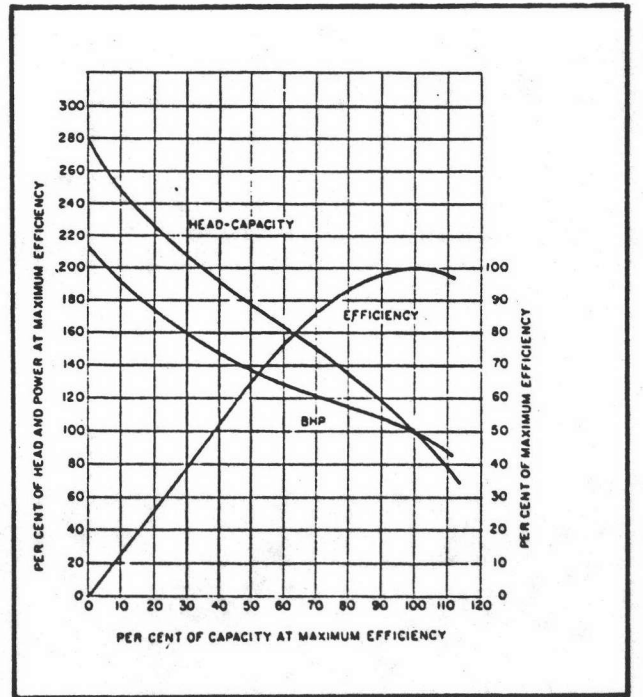
รูปที่ (3-24 ก) เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำที่มีความเร็วจำเพาะ $N_s = 600$



รูปที่ (3-24 ข) เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำที่มีความเร็วจำเพาะ $N_s = 1550$



รูปที่ (3-24 ค) เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำที่มีความเร็วจำเพาะ $N_s = 4000$



รูปที่ (3-24 ง) เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำที่มีความเร็วจำเพาะ $N_s = 10000$

รูปที่ (3-24) โค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำที่มีค่าความเร็วจำเพาะต่างๆ

3.2.12 การเกิดโพรงไอ (Cavitation) ภายในเครื่องสูบน้ำ

คุณสมบัติของของเหลวอย่างหนึ่ง ที่มีผลต่อการไหลภายในเครื่องสูบน้ำก็คือ ความดันไอของของเหลว โดยปกติ น้ำซึ่งเป็นของเหลวชนิดหนึ่งจะกลายเป็นไอ (เดือด) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิ 1 บรรยากาศ (101.32 กิโลปาสกาล) ความดันไอของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง นอกจากนี้การกลายสภาพเป็นไอยังขึ้นอยู่กับค่าความดันภายนอกด้วย เมื่อความดันลดลงจนถึงจุดหนึ่ง น้ำอาจจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอได้ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเดือดปกติ การลดลงของความดันจนต่ำกว่าความดันของบรรยากาศนี้มักจะเกิดขึ้นในส่วนของระบบสูบน้ำที่เป็นท่อดูด (Suction Pipe) โดยเฉพาะส่วนปลายของใบพัดภายในเครื่องสูบน้ำ ซึ่งมีค่าพลังงานจลน์ค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้ค่าความดันในส่วนนี้ลดต่ำลงไปอีก จนในบางครั้งทำให้น้ำในบริเวณนี้กลายสภาพจากของเหลวเป็นไอโดยที่อุณหภูมียังไม่ถึงจุดเดือด การกลายสภาพเป็นไอของน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการสูบน้ำลดลง จะเกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องสูบน้ำ นอกจากนี้ในบริเวณส่วนปลายของใบพัด จะเกิดการกระแทกของฟองไอน้ำกับตัวของใบพัด ทำให้เกิดหลุมเล็กๆ บริเวณส่วนปลายของตัวใบพัด ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องสูบน้ำ

รูปที่ (3-26) ได้แสดงถึงสภาพระดับพลังงานในส่วนของท่อดูดของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตลอดความยาวท่อในส่วนที่เป็นท่อดูด จะมีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งถ้าหากการติดตั้งเครื่องสูบน้ำอยู่สูงจากระดับผิวน้ำอิสระยิ่งมากเท่าไร ก็จะทำให้ความดันในห้องของเครื่องสูบน้ำลดลงมาก ค่าสูงสุดของหัวพลังงานที่จะได้จากการกระทำของเครื่องสูบน้ำ โดยไม่เกิดโพรงไอน้ำขึ้นภายในเครื่องสูบน้ำ จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วจำเพาะ และระดับความสูงที่ติดตั้งเครื่องสูบน้ำจากผิวน้ำอิสระ จากรูปที่ (3-25) จะได้ว่าระดับของหัวพลังงานความดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure Head) ที่ปากทางเข้าสู่เครื่องสูบน้ำ จะมีค่าดังแสดงในรูป

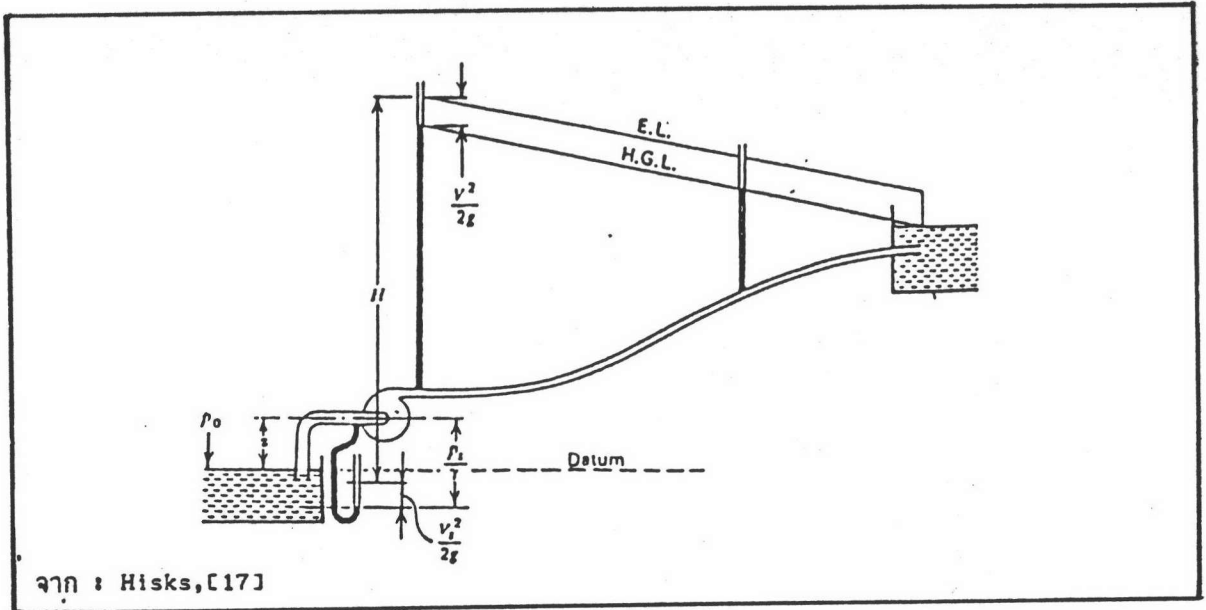
ระดับหัวพลังงานความดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure Head)

$$= P_{atm} / \gamma - V_u^2 / 2g - Z_u - H_L$$

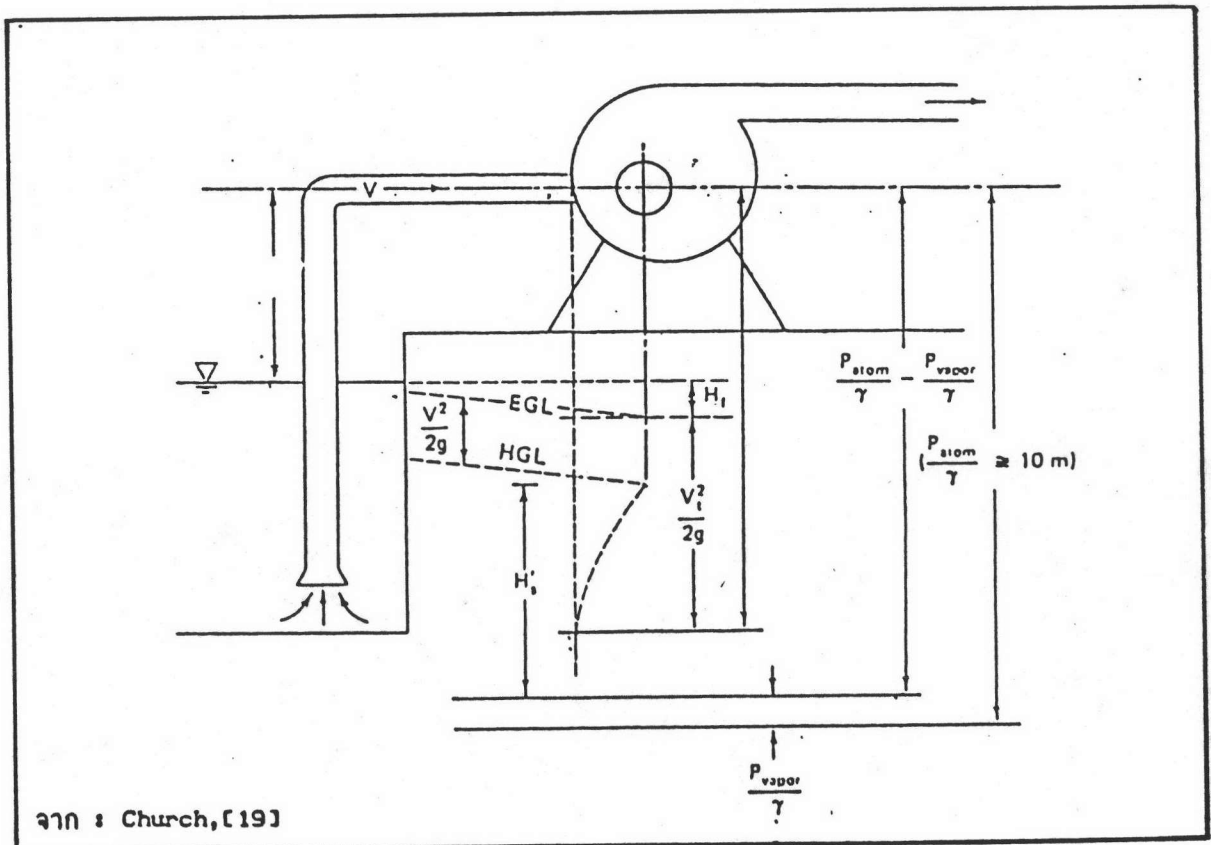
โดยที่ P_{atm} / γ = หัวพลังงานความดันบรรยากาศ (Atmospheric Pressure Head)

$V_u^2 / 2g$ = หัวพลังงานความเร็วในท่อดูด (Velocity Head)

Z_u = ระดับความสูงจากศูนย์กลางเครื่องสูบน้ำ จนถึงระดับผิวน้ำอิสระ



รูปที่ (3-25) รูปแสดงความหมายของเทอมต่างๆ เพื่อใช้ในการกำหนดตัวแปรการเกิดโพรงภายในเครื่องสูบน้ำ



รูปที่ (3-26) ลักษณะค่าเทอมต่างๆที่ใช้ในการคิดความดันภายในท่อดูด

H_L = ผลรวมของหัวพลังงานเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อดูด

ในการพิจารณาการเกิดโพรงบริเวณส่วนของท่อดูดนี้ ค่าของเทอมทั้งหมดทางขวามือ จะต้องมีค่ามากกว่า หัวพลังงานความดันไอของน้ำ (P_v/γ) นั่นคือ

$$P_v/\gamma < P_{atm}/\gamma - V_u^2/2g - Z_u - H_L$$

ดังนั้นในการศึกษาเครื่องสูบน้ำในส่วนของท่อดูด จึงได้มีการกำหนดตัวแปรขึ้นเพื่อใช้ในการพิจารณาเกี่ยวกับปัญหาการเกิดโพรงไภายในเครื่องสูบน้ำซึ่งเรียกว่า หัวดูดบวกสุทธิที่มีอยู่ (Net Positive Suction Head, NPSH) ซึ่งค่าหัวดูดบวกสุทธิที่มีอยู่หมายถึง ค่าหัวพลังงานความดันสมบูรณ์ของบรรยากาศ (Absolute Pressure Head of Atmospheric Pressure) ลบด้วยค่าหัวพลังงานในส่วนของท่อดูดทั้งหมด กับค่าหัวพลังงานเนื่องจากความดันไอของของเหลว

$$\text{NPSH } (h_{uv}) = (P_{atm}/\gamma) - (P_v/\gamma) - (V_u^2/2g + Z_u + H_L) \dots (3.2.23)$$

ค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมี (Required NPSH) ความดันต่ำสุดในเครื่องสูบน้ำมักจะเกิดขึ้นในเครื่องสูบน้ำที่จุดเลยจากทางเข้าของเครื่องสูบน้ำไปเล็กน้อย เนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของความเร็วของมวลของของเหลวในบริเวณนี้ ดังนั้นในส่วนนี้จึงต้องกำหนดให้สภาวะที่เกิดความดันต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นในเครื่องสูบน้ำในบริเวณนี้ จะต้องมีค่าสูงกว่าความดันไอของของเหลว ซึ่งถ้าหากความดันในส่วนนี้ต่ำกว่าค่าความดันไอของของเหลว ของเหลวที่อยู่ในบริเวณนี้ก็จะไม่สามารถคงสภาวะอยู่ในสภาวะของของเหลวได้อีกต่อไป หัวพลังงานความดันที่ตกไปจากหัวพลังงานความดันบรรยากาศ เรียกว่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมี ค่าดังกล่าวจะต้องมีค่ามากกว่า หัวพลังงานความดันไอของของเหลวที่สูบน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำ ค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องสูบน้ำ และ ค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมี สำหรับเครื่องสูบน้ำตัวเดียวกันจะเปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราการไหล และความเร็วรอบ

ค่าหัวดูดบวกสุทธิที่มีอยู่ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.2.23) ส่วนค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมีจะหาได้จาก เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะ และสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ ที่บริษัทผู้ผลิตทำขึ้น อย่างไรก็ตามอาจหาค่าดังกล่าวได้คร่าวๆ โดยหากให้ค่าหัวพลังงานรวมของเครื่องสูบน้ำในขณะที่มีประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ H_T และค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมีมีค่าเท่ากับ H_{uv} โดยตัวแปรที่กำ-

หน่วยใหม่นี้เรียกว่า ตัวแปรของการเกิดโพรงภายในเครื่องสูบลูกสูบ (Cavitation Parameter, σ)

$$\sigma = H_{\text{b.v.n.}}/H_T \dots\dots\dots(3.2.24)$$

สำหรับเครื่องสูบลูกสูบเครื่องหนึ่งจะมีค่าหัวดูดบวกสุทธิที่น้อยที่สุดอยู่ค่าหนึ่ง ก่อนที่จะเกิดโพรงขึ้นภายในเครื่องสูบลูกสูบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าวิกฤตของตัวแปรของการเกิดโพรงภายในเครื่องสูบลูกสูบ (Critical Cavitation Parameter, σ_c) โดยที่

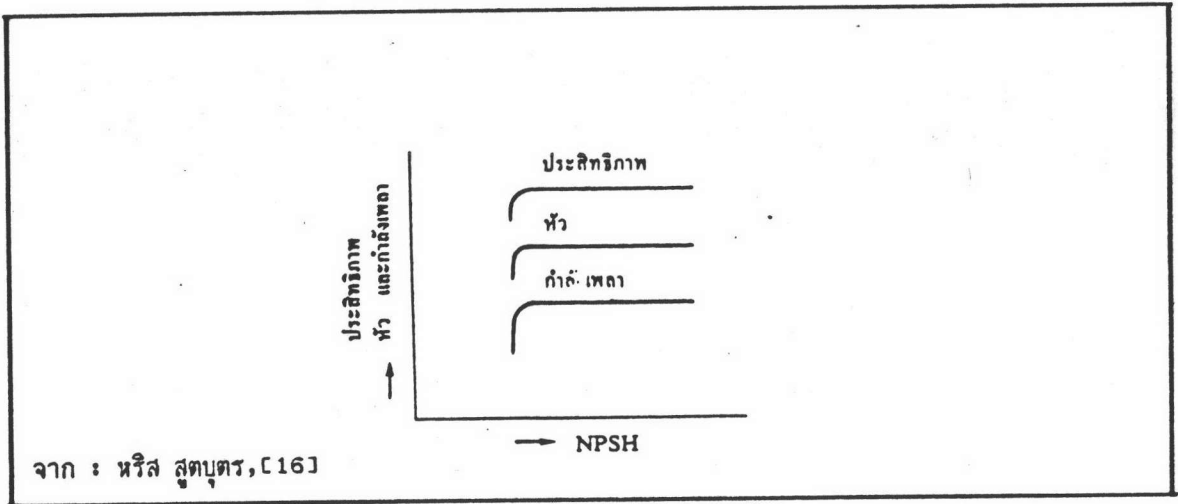
$$\text{NPSH} = \sigma_c H = P_{\text{atm}}/\gamma - P_v/\gamma - Z_s - \Sigma H_L$$

$$Z_s = (P_{\text{atm}}/\gamma - P_v/\gamma) - \Sigma H_L - \text{NPSH}$$

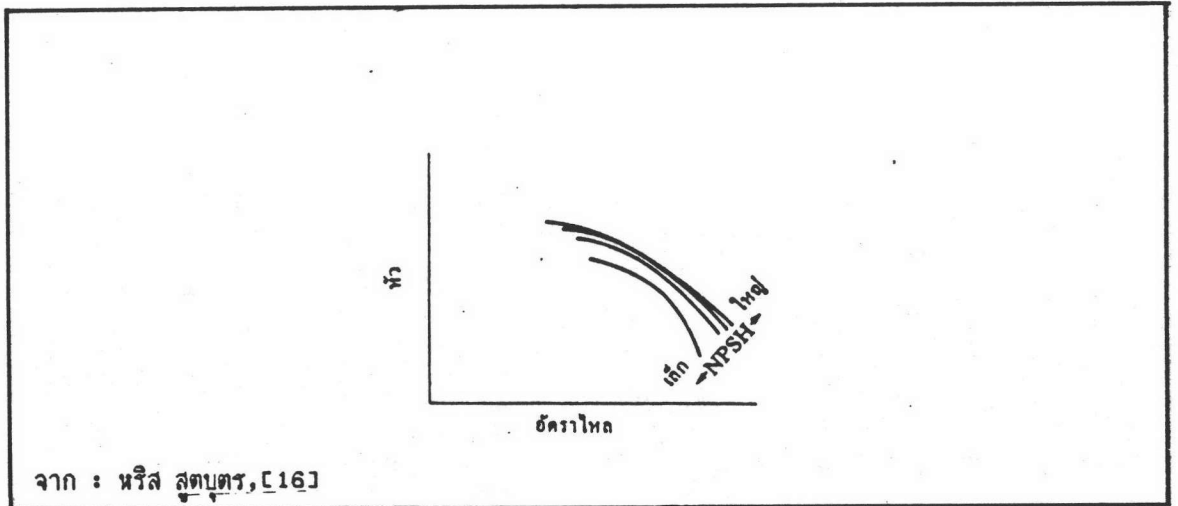
โดยที่ H เป็นค่าหัวพลังงานที่ได้จากเครื่องสูบลูกสูบ และค่า σ_c (Cavitation Parameter) จะขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบของเครื่องสูบลูกสูบ ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 0.05 เมื่อ $N_u = 1000$ (ในระบบอังกฤษ) จนถึง 1.0 เมื่อ $N_u = 8000$ ซึ่งในบางครั้งผู้ผลิตจะให้ค่า NPSH ที่สภาพการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ มาให้ด้วย

วิธีการหาผลกระทบของค่าหัวดูดบวกสุทธิต่อสมรรถนะของเครื่องสูบลูกสูบ มีอยู่ 2 วิธีคือ โดยการเปลี่ยนค่าหัวดูดบวกสุทธิ ในขณะที่อัตราการไหลคงที่ซึ่งแสดงในรูปที่ (3 - 27) แล้วทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าหัวรวมพลังงาน กำลังเพลลา และประสิทธิภาพของเครื่องสูบลูกสูบ ส่วนอีกวิธีหนึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพ และเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบลูกสูบ ที่อัตราการไหล และค่าหัวดูดบวกสุทธิที่ค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ (3 - 29) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของเครื่องสูบลูกสูบจะขึ้นอยู่กับความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบลูกสูบ โดยที่ถ้าหากเครื่องสูบลูกสูบที่มีค่าความเร็วจำเพาะต่ำ เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะมักจะหักลงอย่างกระทันหัน เมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นเลยจากจุดประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนเครื่องสูบลูกสูบที่มีค่าความเร็วจำเพาะสูง เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะจะค่อยๆ ลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ (3 - 28) ซึ่งในทั้งสองวิธีค่าหัวดูดบวกสุทธิตรงจุดที่เส้นโค้งแสดงสมรรถนะของเครื่องเริ่มลดลงคือจุดที่แสดงให้เห็นถึงค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมี

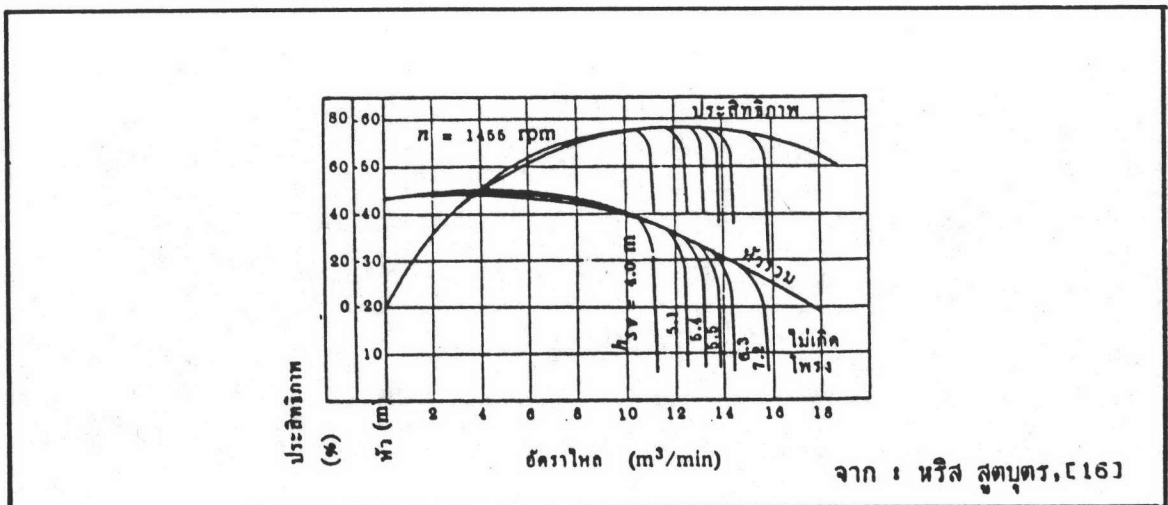
ผลกระทบจากภายนอกที่มีผลต่อค่าหัวดูดบวกสุทธิที่มีอยู่ ก็คือการเปลี่ยนแปลงค่าความดันบรรยากาศ และค่าความดันไอของของเหลว และสาเหตุที่ทำให้ค่าความดันทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ (3-27) การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำ เมื่อ NPSH เปลี่ยนขณะที่อัตราการไหลของเครื่องสูบลคงที่



รูปที่ (3-28) การเปลี่ยนแปลงของหัวพลังงาน และอัตราการไหล เมื่อ NPSH เปลี่ยนของเครื่องสูบน้ำที่มีการไหลแบบผสม และเครื่องสูบน้ำที่มีการไหลตามแนวแกน



รูปที่ (3-29) การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ และหัวพลังงาน เมื่อ NPSH เปลี่ยนสำหรับเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง

ก็คือ อุณหภูมิ และความสูงของภูมิประเทศจากระดับน้ำทะเล โดยปกติความดันไอของน้ำจะขึ้นอยู่กั ค่าอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นความดันไอของน้ำก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งทำให้น้ำกลายเป็นไอได้ง่ายขึ้นเมื่อความดันลดลง นอกจากนี้ความสูงของภูมิประเทศก็มีผลต่อค่าความดันบรรยากาศ โดยที่ความดันบรรยากาศจะมีค่าลดลง เมื่อความสูงของภูมิประเทศเพิ่มขึ้น ผลกระทบทั้งสองนี้จะส่งผลโดยตรงต่อค่าหัวดูดบวกสุทธิของเครื่องสูบ

การป้องกันการเกิดโพรงไอ (Cavitation) ภายในเครื่องสูบ การสูบน้ำที่มีระดับผิวน้ำต่ำจากตัวเครื่องสูบมาก ๆ มักจะเกิดปัญหาของการเกิดโพรงขึ้นภายในเครื่องสูบ การป้องกันการเกิดโพรงไภายในเครื่องสูบทำได้ โดยการทำให้ค่าหัวดูดบวกสุทธิที่มีอยู่สูงกว่าค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมี หรือพูดง่าย ๆ ก็คือ จะต้องมิให้ความดันภายในเครื่องสูบในส่วนใดส่วนหนึ่งของเครื่องสูบลดต่ำกว่าค่าความดันไอของของเหลว ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศนั้น บริษัทผู้ผลิตส่วนใหญ่จะเป็นผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับการลดค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมีของเครื่องสูบ ซึ่งถูกกำหนดมาให้ตามข้อมูลรายละเอียดของเครื่องสูบน้ำชนิดนั้น ๆ ส่วนการเพิ่มค่าหัวดูดบวกสุทธิจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการติดตั้งเครื่องสูบ อัตราการไหล และช่วงของหัวพลังงานในขณะใช้งาน โดยผู้ใช้จะเป็นผู้กำหนด ส่วนข้อแนะนำสำหรับการติดตั้งเครื่องสูบมีดังต่อไปนี้คือ

- 1) ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องสูบควรอยู่ใกล้กับระดับผิวน้ำอิสระมากที่สุด
- 2) ความยาวของท่อดูดควรให้สั้นที่สุด เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้ให้น้อยที่สุด หรืออาจจะลดการสูญเสียพลังงานโดยการใช้ท่อดูดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
- 3) ไม่ควรมีการติดตั้งวาล์วควบคุมการไหลในส่วนของท่อดูดโดยเด็ดขาด
- 4) ในกรณีการใช้งานของเครื่องสูบที่มีค่าหัวพลังงานต่ำ แต่มีค่าอัตราการไหลสูง จะทำให้ค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมีมีค่าสูงขึ้นตามค่าอัตราการไหล ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดโพรงไอขึ้นภายในเครื่องสูบได้ ดังนั้นในการเลือกใช้เครื่องสูบประเภทนี้จึงต้องกำหนดค่าหัวรวมของพลังงานไม่ให้มีช่วงกว้างจนเกินไป และจะต้องเลือกเครื่องสูบที่ความเหมาะสม
- 5) สำหรับเครื่องสูบน้ำที่จำเป็นต้องใช้ในสภาพการทำงาน ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าหัวพลังงานมาก ๆ ทางท่อดูดมักจะเกิดปัญหาในเรื่องของการเกิดโพรงไภายในเครื่องสูบ ในกรณีที่อัตราการไหลมีค่ามากกว่าค่าอัตราการไหลที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด และในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าหัวพลังงานในท่อดูดมาก ๆ ในลักษณะเช่นนี้อาจมีความจำเป็นที่จะต้องยอมให้เกิดการเกิดโพรงไอขึ้นภายในเครื่องสูบได้บ้าง เพื่อความประหยัด และในกรณีเช่นนี้ควรเลือกใบพัดของเครื่องสูบที่ใช้วัสดุที่สามารถทนการสึกกร่อนเนื่องจากสาเหตุของการเกิดโพรงไภายในเครื่องสูบ

3.2.13 การสูญเสียพลังงานของการไหลภายในท่อ

การไหลจะเกิดขึ้นถ้าหากมีความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างจุด 2 จุดที่ถูกเชื่อมโยงด้วยตัวกลาง ความแตกต่างของระดับพลังงานที่เกิดขึ้น จะถูกใช้ไปในการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากสาเหตุต่างๆ สำหรับการไหลของน้ำในท่อ สาเหตุของการสูญเสียพลังงานจะเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่ผนังท่อทำต่อมวลของน้ำ โดยทั่วไปการสูญเสียพลังงานภายในท่อจะแยกพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะคือ การสูญเสียพลังงานหลัก (Major Loss) การสูญเสียพลังงานส่วนนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากความยาวของท่อ ซึ่งถือเป็นการสูญเสียหลัก โดยเฉพาะท่อที่มีความยาวมาก ๆ ส่วนการสูญเสียอีกส่วนหนึ่ง จะมีผลเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ถูกนำมาติดตั้งในระบบท่อส่งน้ำ ได้แก่ วาล์วควบคุมการไหล เครื่องมือสำหรับวัดอัตราการไหล ข้อต่อต่างๆ ข้อลด-ขยาย และข้อต่อต่างๆ เป็นต้น

การคิดค่าการสูญเสียพลังงานภายในท่อจึงมักแยกออกเป็นสองส่วนเช่นเดียวกัน คือ การสูญเสียพลังงานหลัก และการสูญเสียพลังงานย่อย สำหรับการสูญเสียพลังงานหลักนั้นโดยทั่วไปนิยมใช้สูตรของ ดาร์ซี ไวส์บาค (1950) ซึ่งเป็นสูตรที่ได้จากการคาดเดา (Empirical formular) และหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่จะมีผลต่อการสูญเสียพลังงานภายในท่อ ซึ่งพบว่า การสูญเสียพลังงานแปรผันตาม ความยาวของท่อ (L) กับค่าหัวพลังงานความเร็ว ($V^2/2g$) และเป็นส่วนกลับกับค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (D)

$$H_L = f(L/D)(V^2/2g) \dots\dots\dots(3.2.25)$$

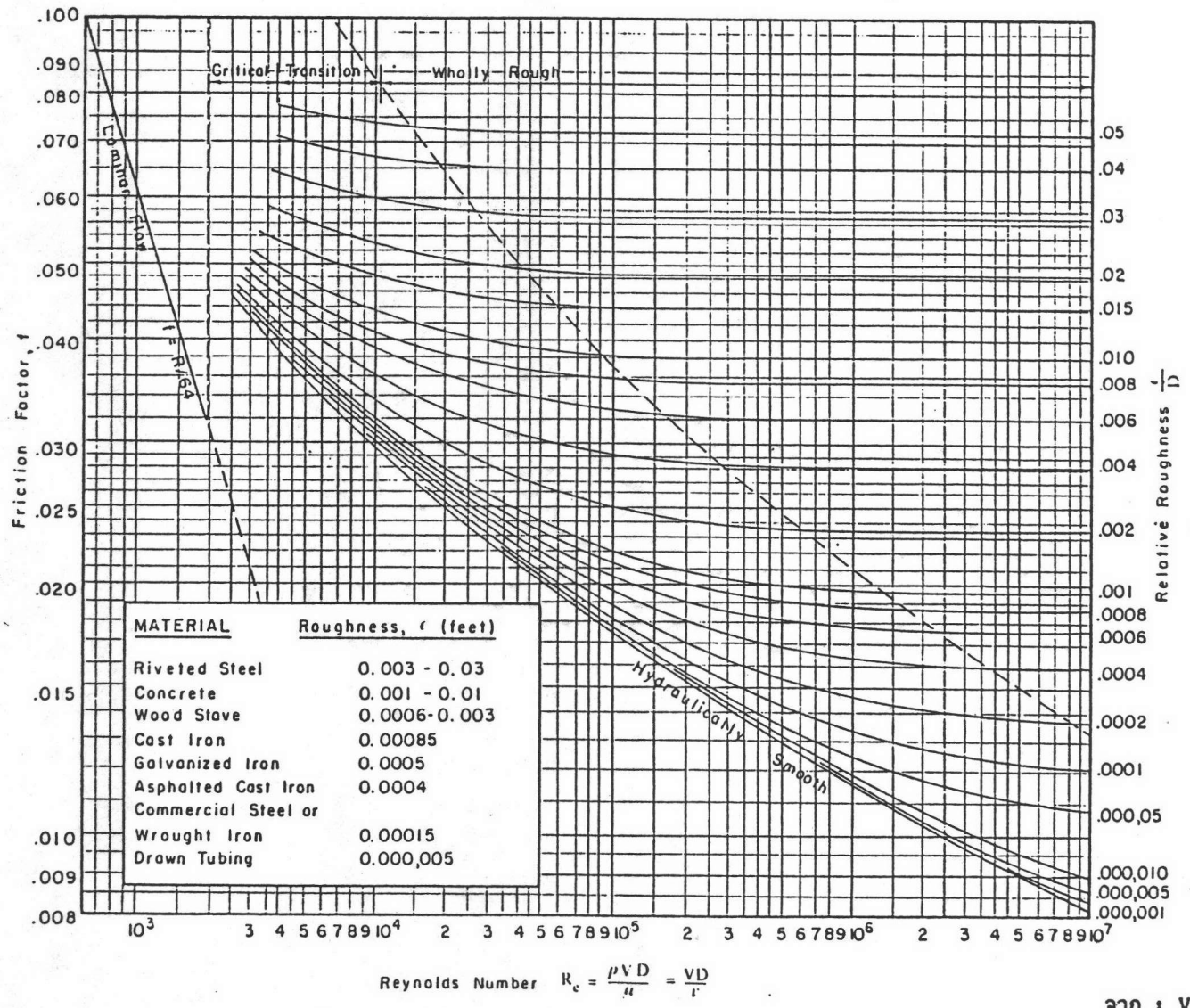
โดยที่ค่า f คือ แฟคเตอร์ของความเสียดทาน (Friction Factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับความขรุขระของผนังท่อ (e) ความหนืดของของเหลว (Viscosity, μ) ขนาดของท่อ (D) ความเร็วของการไหล (V) และรูปร่างของท่อ เลวิส. เอฟ. มูดี้ (1944) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของน้ำในท่อ และได้สรุปดังรูปที่ (3-30 ก) ซึ่งเรียกว่า มูดี้ ไดอะแกรม (Moody's Diagram) โดยแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อค่าแฟคเตอร์ของความเสียดทาน โดยที่ค่าแฟคเตอร์ของความเสียดทาน เป็นฟังก์ชันกับค่าความขรุขระของผนังท่อ (e) และ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเนื่องจากความหนืด และแรงเนื่องจากความเฉื่อย หรือเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$\text{Friction Factor } (f) = f(e/D, N_{Re}) \dots\dots\dots(3.2.26)$$

โดยที่ e = ความสูงของความขรุขระซึ่งผันแปรตามชนิดของวัสดุ
 e/D = ความขรุขระสัมพัทธ์ (Relative Roughness)

จากการทดลองของ Moody สามารถสรุปลักษณะการไหลของน้ำในท่อได้ 3 ลักษณะคือ การไหลแบบราบเรียบ ในช่วงนี้ค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน จะมีค่าลดลงเมื่อ เรย์โนลด์ นัมเบอร์ มีค่าเพิ่มขึ้น หรือแสดงว่าความเร็วของการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงค่า เรย์โนลด์ นัมเบอร์ มีค่าประมาณ 2000 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในช่วงดังกล่าวผลของแรงเนื่องจากความหนืดมีอิทธิพลมากกว่าผลของแรงเนื่องจากความเฉื่อย และค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อความเร็วของการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่ง $f = 64/N_u$ ซึ่งถือว่าการไหลในช่วงดังกล่าว เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ในช่วงดังกล่าวจึงแสดงให้เห็นว่าผลของความขรุขระของผนังท่อไม่มีผลต่อการสูญเสียพลังงานของการไหลแต่อย่างใด ถัดมาเมื่อความเร็วของการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่า เรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynold Number) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็ว โดยในช่วงที่ค่า N_u มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 2000 จนถึง 4000 สำหรับการไหลของน้ำในท่อค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานจะผันแปร และมีความไม่แน่นอนในช่วงดังกล่าวจึงเป็นการไหลแบบวิกฤต (Critical or Transition Flow) และเมื่อค่า Reynold Number (N_u) มีค่ามากกว่า 4000 ค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานจะเริ่มมีค่าคงที่ไม่ได้มีค่าผันแปรตามค่าของ N_u มากนัก แต่จะผันแปรตามค่าความสูงสัมพัทธ์ความขรุขระของท่อ (e/d) มากกว่า การไหลในช่วงนี้จะเป็นการไหลที่เรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) โดยทั่วไปการไหลของน้ำในท่อมักจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนมากกว่า การไหลแบบอื่น การหาค่าการสูญเสียพลังงานภายในท่อจะใช้สมการของ ดาร์ซี ไวท์บาค ประกอบกับ มูดดีไดอะแกรม ซึ่งหากรู้ชนิด, ขนาด, และอัตราการไหลภายในท่อ ก็สามารถที่จะหาค่าการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้ได้

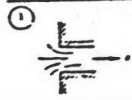
การสูญเสียพลังงานในส่วนย่อย การสูญเสียพลังงานในส่วนนี้โดยทั่วไปจะแปรตามค่ากำลังสองของค่าหัวพลังงานความเร็ว ($V^2/2g$) พลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้จะเกิดขึ้นในบริเวณอุปกรณ์ที่นำมาต่อเข้ากับระบบท่อส่งน้ำ เช่น ข้อต่อที่ใช้สำหรับเพิ่มหรือลดพื้นที่หน้าตัดของการไหล (Expansion & Contraction) ข้อต่อโค้งต่างๆที่ใช้สำหรับเปลี่ยนทิศทางการไหล (Bend) วาวส์ หรือประตูน้ำที่ใช้สำหรับควบคุมการไหล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตราการไหล (Venturi Meter) นอกจากนี้การสูญเสียพลังงานในส่วนย่อยนี้ ยังนับรวมเอาการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ปากทางเข้า และปากทางออกของระบบท่อส่งน้ำ ซึ่งการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของปากทางเข้าและออกของระบบท่อส่งน้ำ สูตรที่ใช้สำหรับการคำนวณการสูญเสียพลังงานใน



จาก : Vennard, [13]

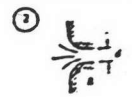
รูปที่ (3-30ก) มดดี ไดอะแกรม

Use the equation $h_e = kv^2/2g$ unless otherwise indicated. Energy loss E_L equals h_e head loss in feet.



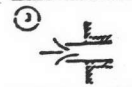
Perpendicular square entrance:

$$k = 0.50 \text{ if edge is sharp.}$$



Perpendicular rounded entrance:

$R/d =$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
$k =$	0.25	0.17	0.08	0.05	0.04



Perpendicular reentrant entrance:

$$k = 0.8$$

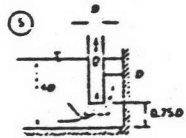


Additional loss due to skewed entrance:

$$k = 0.505 + 0.303 \sin \alpha + 0.226 \sin^2 \alpha$$

Suction pipe in sump with conical mouthpiece:

$$E_L = D + \frac{5.6Q}{\sqrt{2gD^{1.5}}} - \frac{v^2}{2g}$$



Without mouthpiece:

$$E_L = 0.53D + \frac{4Q}{\sqrt{2gD^{1.5}}} - \frac{v^2}{2g}$$

Width of sump shown: $3.5D$

(After I. Vágás)

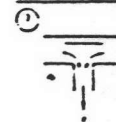
Strainer bucket:

$$k = 10 \text{ with foot valve}$$

$$k = 5.5 \text{ without foot valve}$$



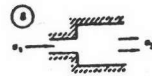
(By Agroskin)



Standard Tee, entrance to minor line

$$k = 1.8$$

Sudden expansion:

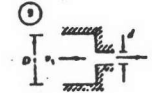


or

$$E_L = \left(1 - \frac{v_1}{v_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g}$$

$$E_L = \left(\frac{v_1}{v_2} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g}$$

Sudden contraction:



$(d/D)^2 =$	0.01	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
$k =$	0.5	0.5	0.42	0.33	0.25	0.15

use v_2 in equation (4.15)

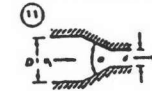
Diffusor:



$$E_L = k(v_1^2 - v_2^2)/2g$$

$\alpha^\circ =$	20	40	60	80
$k =$	0.20	0.28	0.32	0.35

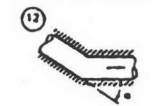
Confusor:



$$E_L = k(v_1^2 - v_2^2)/2g$$

$\alpha^\circ =$	6	10	20	40	60	80	100	120	140
k for									
$D = 3d$	0.12	0.16	0.39	0.80	1.0	1.06	1.04	1.04	1.04
$D = 1.5d$	0.12	0.16	0.39	0.96	1.22	1.16	1.10	1.06	1.04

Sharp elbow:



$$k = 67.6 \times 10^{-4} (\alpha^\circ)^{1.7}$$

(By Gibson)

Bends:



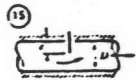
$$k = (0.13 + 1.85(r/R)^{1.5}) \sqrt{\alpha^\circ/180^\circ}$$

(By Hinds)

Close return bend:



$$k = 2.2$$



Gate valve:

$e/D =$	0	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
$k =$	0.15	0.26	0.81	2.06	5.52	17.0	97.8



Globe valve:

$k = 10$ when fully open



Rotary valve:

$\alpha^\circ =$	5	10	20	30	40	50	60	70	80
$k =$	0.05	0.29	1.56	5.47	17.3	52.6	206	485	∞

(By Agroskin)



Check valves:

Swing type $k = 2.5$ when fully open

Ball type $k = 70.0$

Lift type $k = 12.0$



Angle valve:

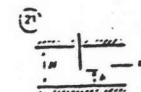
$k = 5.0$ if fully open

Segment gate in rectangular conduit:

$$k = 0.3 + 1.3 \left[\left(\frac{1}{n} \right) \right]^2$$

where $n = \varphi/\varphi_0 =$ the rate of opening with respect to the central angle.

(By Abelyev)

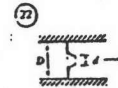


Sluice gate in rectangular conduit:

$$k = 0.3 + 1.9 \left[\left(\frac{1}{n} \right) - n \right]^2$$

where $n = h/H$.

(By Burkov)



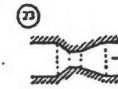
Measuring nozzle:

$$E_L = 0.3 \Delta p \quad \text{for } d = 0.8D$$

$$E_L = 0.95 \Delta p \quad \text{for } d = 0.2D$$

where Δp is the measured pressure drop.

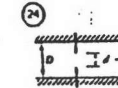
(By A.S.M.E.)



Venturi meter:

$$E_L = 0.1 \Delta p \quad \text{to} \quad 0.2 \Delta p$$

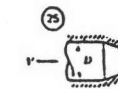
where Δp is the measured pressure drop.



Measuring orifice, square edged:

$$E_L = \Delta p \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right)$$

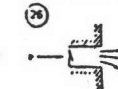
where Δp is the measured pressure drop.



Confusor outlet:

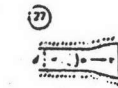
$d/D =$	0.5	0.6	0.8	0.9
$k =$	5.5	4	2.55	1.1

(By Mostkov)



Exit from pipe into reservoir:

$$k = 1.0$$



Diffuser outlet for $D/d > 2$:

$\alpha^\circ =$	8	15	30	45
$k =$	0.05	0.18	0.5	0.6

(By Mostkov)

in which C_c represents the conveyance of a hydraulic device creating a local loss in a piping system.

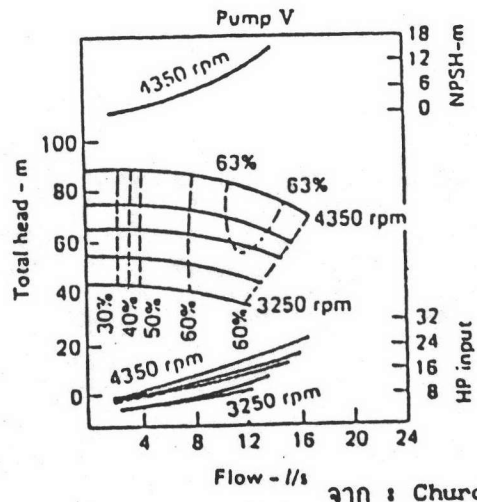
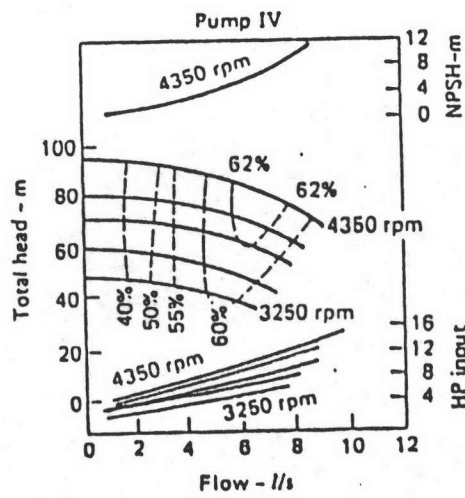
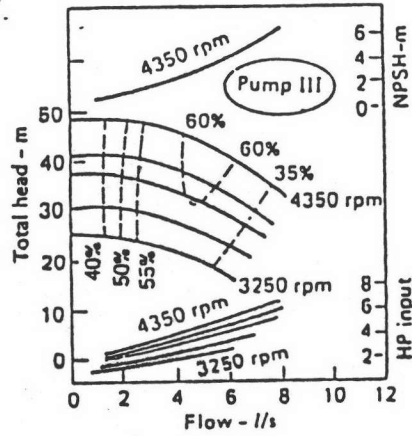
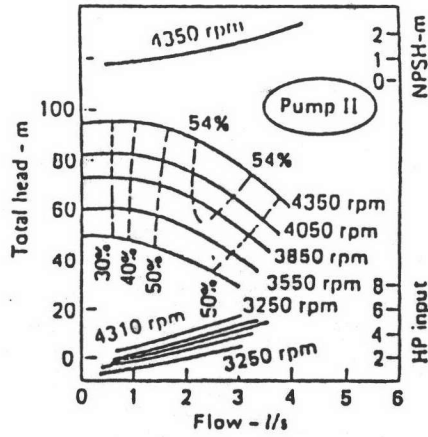
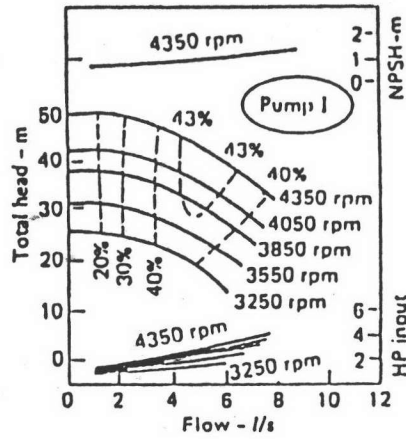
ส่วนย่อยนี้ จะมีลักษณะอย่างเดียวกันคือจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวหนึ่งคูณด้วยค่าหัวพลังงานความเร็ว

$$H_e = K(V^2/2g) \dots\dots\dots(3.2.27)$$

เมื่อ K คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียพลังงานของอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งในระบบท่อส่งน้ำ ซึ่งสูตร และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานได้สรุปเอาไว้ดังแสดงในรูปที่ (3-30ข)

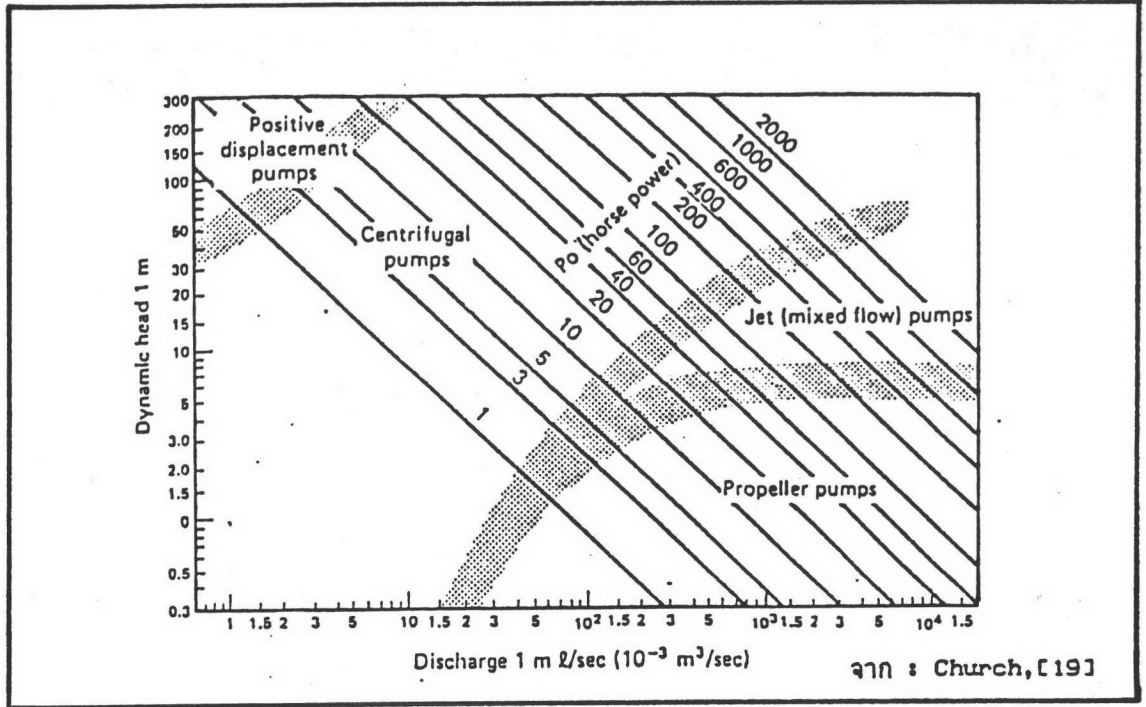
3.2.14 การเลือกใช้เครื่องสูบน้ำ

สภาวะและประเภทของการสูบน้ำ จะมีความแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับความต้องการเป็นหลัก การเลือกใช้เครื่องสูบน้ำจึงต้องพิจารณาอย่างรอบครอบ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งานของเครื่องสูบน้ำในแต่ละประเภท เพราะเครื่องสูบน้ำแต่ละขนาดแต่ละประเภทจะมีความเหมาะสมกับประเภทของงานไม่เหมือนกัน ในการพิจารณาเลือกใช้เครื่องสูบน้ำจะต้องรู้สภาวะต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสูบน้ำเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพิจารณา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้แก่ ค่าระดับพลังงานรวมในการสูบน้ำ ค่าอัตราการไหลที่ต้องการ ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ และสภาพทางกายภาพและข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ ข้อมูลเหล่านี้จะให้เป็นข้อมูลอย่างหยาบๆ เพื่อใช้ในการเลือกชนิดของเครื่องสูบน้ำอย่างคร่าวๆ โดยนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณหาค่าความเร็วจำเพาะของเครื่องสูบน้ำ เพื่อกำหนดประเภทของเครื่องสูบน้ำที่จะใช้อย่างคร่าวๆเสียก่อน จากนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือค่าประสิทธิภาพในการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำซึ่งโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการไหล หัวรวมของพลังงานในสนาม และค่ากำลังงานที่ต้องการ ในรูปที่ (3-31) ได้แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ของหัวพลังงานและกำลังงานที่ใช้ กับค่าอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำที่มีค่าความเร็วจำเพาะต่างๆกันที่ความเร็วรอบคงที่ ส่วนรูปที่ (3-32) ได้แสดงขอบเขตการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงชนิดศูนย์ชนิดต่างๆ การเลือกชนิดของเครื่องสูบน้ำ โดยทั่วไปมักจะคำนึงถึงค่าประสิทธิภาพในการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำเป็นหลัก ดังนั้นในการเลือกใช้เครื่องสูบน้ำ จึงควรพยายามเลือกให้สภาวะความต้องการที่เป็นอยู่อยู่ในบริเวณขอบเขตของเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในช่วงที่มีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด และนอกจากนี้สิ่งที่ควรพิจารณาประกอบควบคู่ไปด้วยเสมอก็คือ สภาพทางกายภาพ และข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ ซึ่งข้อจำกัดทางกายภาพเหล่านี้จะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพในการสูบน้ำได้โดยตรง เช่น ในเรื่องของกาเกิดโพรงไวกายในเครื่องสูบน้ำ ปัญหา

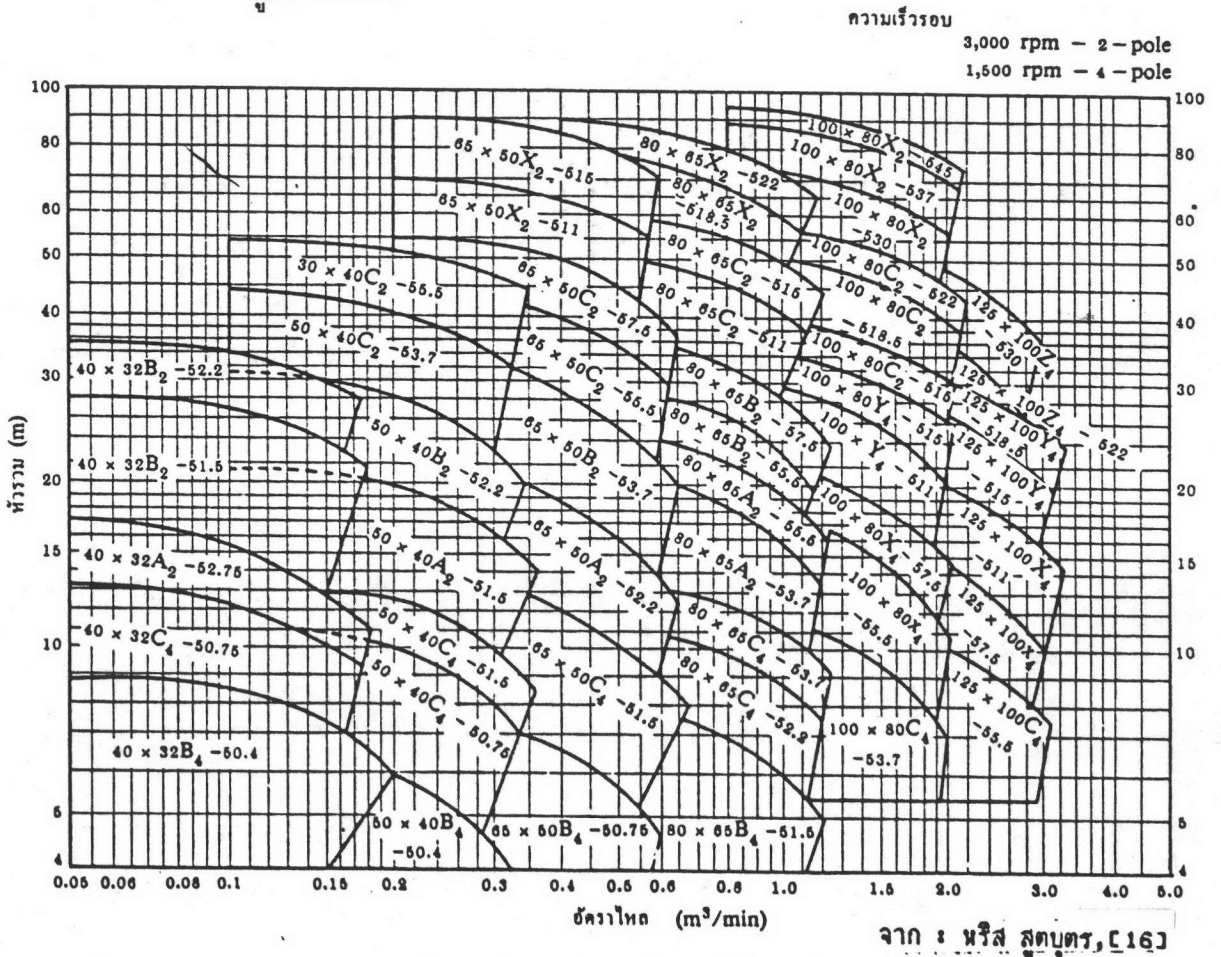


จาก : Church, [19]

รูปที่ (3-31) ข้อมูลแสดงสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ เพื่อให้ประกอบการตัดสินใจเลือกใช้เครื่องสูบน้ำ



รูปที่ (3-32) ความสัมพันธ์ของหัวพลังงาน อัตราการไหล และกำลังงานที่ใช้ขับของเครื่องสูบน้ำชนิดต่างๆ



รูปที่ (3-33) ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการเลือกเครื่องสูบน้ำ เมื่อรู้ความต้องการของหัวพลังงานและอัตราการไหล

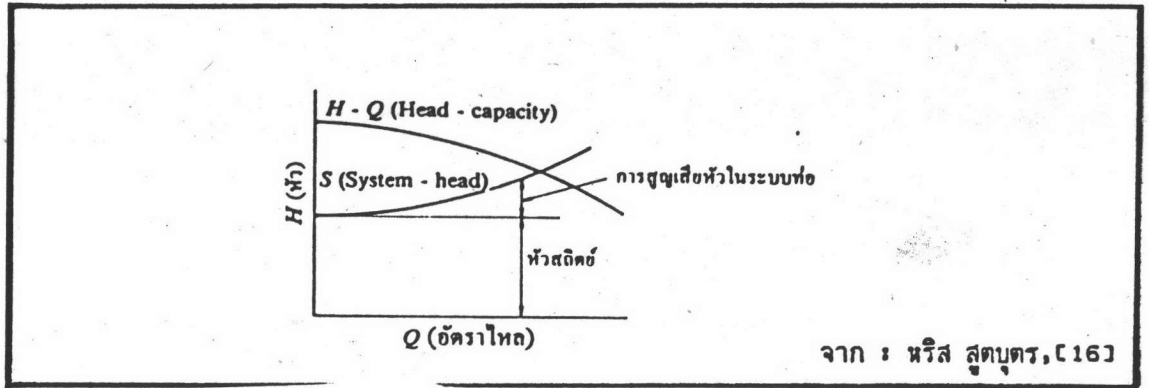
ในเรื่องของการส่งถ่ายพลังงาน เป็นต้น

การใช้เครื่องสูบน้ำนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องรู้สภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำว่าอยู่ในสภาพอย่างไร รูปที่ (3 - 34) ได้แสดงเส้นโค้งของอัตราการไหล กับค่าหัวพลังงานรวมของเครื่องสูบน้ำ และเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหล กับค่าหัวพลังงานที่สูญเสียภายในระบบท่อส่งน้ำ จุดที่เส้นโค้งทั้งสองตัดกันจะเป็นจุดที่แสดงถึงสภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ในส่วนของเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการไหล กับค่าหัวพลังงานที่สูญเสียภายในระบบท่อส่งน้ำจะประกอบด้วย ค่าหัวพลังงานสถิตย์ (Static Head) ซึ่งจะมีค่าคงที่ถ้าหากระดับผิวน้ำอิสระ และความดันที่กระทำต่อผิวน้ำอิสระไม่เปลี่ยนแปลง และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นค่าหัวพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ การสูญเสียพลังงานในส่วนนี้โดยทั่วไปจะแปรผันกับค่าหัวพลังงานความเร็วของการไหลภายในท่อส่งน้ำ

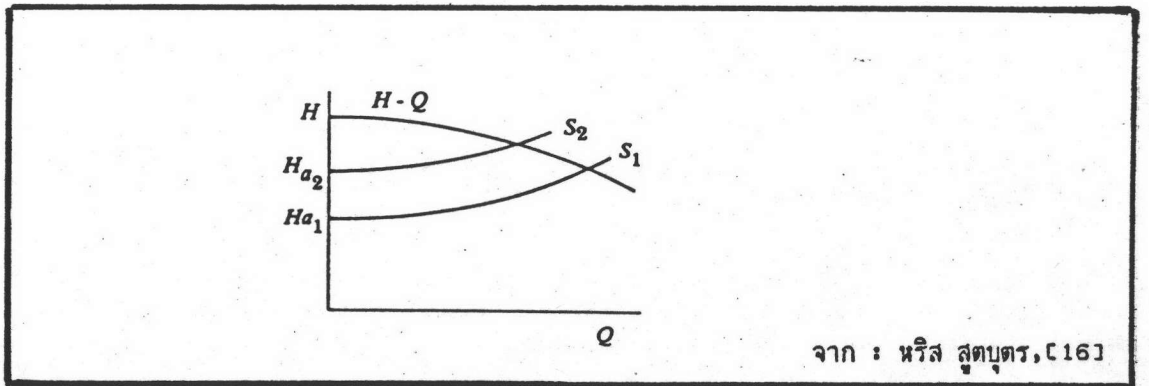
การเปลี่ยนแปลงเส้นโค้งอัตราการไหล กับ การสูญเสียพลังงานในระบบท่อส่งน้ำจะมีอยู่สองลักษณะคือการเปลี่ยนแปลงของค่าหัวพลังงานสถิตย์ และการเปลี่ยนแปลงระดับหัวพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ ในรูปที่ (3 - 35) และ (3 - 36) ได้แสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำ เมื่อค่าหัวพลังงานที่สูญเสียทั้งสองเปลี่ยนแปลง หากค่าหัวพลังงานสถิตย์เปลี่ยนแปลงจาก $H_{a_1} - s_1$ ไปเป็น $H_{a_2} - s_2$ จะทำให้สภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ (3 - 36) ส่วนการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานภายในเส้นท่อจะทำให้สภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำเปลี่ยนจาก $H_a - s_1$ ไปเป็น $H_a - s_2$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้ อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์ว หรือประตูน้ำ หรือค่าความขรุขระของผนังท่อที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ท่อไปนานๆ ซึ่งเมื่อสภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำเปลี่ยนไปจึงควรที่จะต้องพิจารณาถึงสิ่งต่อไปนี้

1) ถ้าหากเครื่องสูบน้ำทำงานที่ค่าอัตราการไหลน้อยๆ จะเป็นสาเหตุก่อให้เกิดปัญหาต่าง ดังนี้ อุณหภูมิภายในเครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้น การเพิ่มของแรงในแฉวรัศมีที่กระทำต่อตัวใบพัด ซึ่งก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกำลังเพลลาที่ใช้ในการขับเครื่องสูบน้ำที่มีค่าความเร็วจำเพาะสูงๆ และจะทำให้เกิดเสียงและการสั่นสะเทือนภายในเครื่องสูบน้ำ

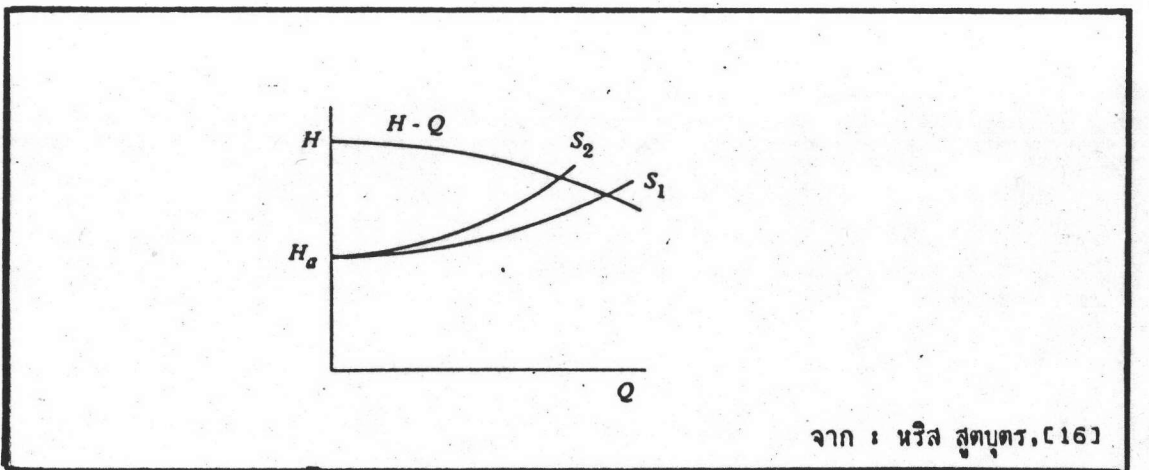
2) ถ้าหากการทำงานของเครื่องสูบน้ำมีอัตราการไหลมากกว่าปกติจะทำให้เกิดปัญหาเหล่านี้ คือ การใช้กำลังเพลลาของเครื่องสูบน้ำมีมากขึ้น สำหรับเครื่องสูบน้ำที่มีค่าความเร็วจำเพาะต่ำ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องของการเกิดโพรงภายในเครื่องสูบน้ำภายในเครื่องสูบน้ำ เนื่องจากความเร็วมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในกรณีที่เครื่องสูบน้ำต้องทำงานที่อัตราการไหลมากกว่าปกติจึงควรเลือกใช้เครื่องสูบน้ำที่



รูปที่ (3-34) เส้นโค้งความสัมพันธ์ของค่าหัวพลังงานของเครื่องสูบน้ำ และ ค่าการสูญเสียพลังงานภายในระบบท่อส่งน้ำ กับค่าอัตราการไหล



รูปที่ (3-35) การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งการสูญเสียพลังงาน เมื่อค่าหัวพลังงานสถิตย์เปลี่ยนแปลง



รูปที่ (3-36) การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งการสูญเสียพลังงาน เมื่อค่าการสูญเสียพลังงานภายในท่อส่งน้ำเปลี่ยนแปลง

สามารถปรับค่ากำลังงานที่จะให้แก่เครื่องสูบลมได้ นอกจากนี้ค่าหัวดูดบวกสุทธิที่จำเป็นต้องมีก็จะมีความเพิ่มขึ้นมากในช่วงที่อัตราการไหลสูงกว่าจุดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นค่าหัวดูดบวกสุทธิที่มีอยู่จะต้องสูงกว่าปกติด้วย

การเลือกใช้เครื่องสูบลม เป็นปัญหาที่ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากสภาพต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสูบลม เช่น สภาพของระดับพลังงานสถิตย์ที่ไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ใช้ขับเครื่องสูบลม การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายในท่อส่งน้ำเมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น และอื่นๆ สิ่งเหล่านี้มักก่อให้เกิดปัญหาในการสูบลมอยู่เสมอ ดังนั้นในการเลือกใช้เครื่องสูบลมจึงควรพิจารณาถึงผลกระทบของสภาพต่างๆที่เกี่ยวข้องในการสูบลมอย่างละเอียด และควรมีการดูแลระบบต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสูบลมอยู่เสมอ

3.3 ทฤษฎีการใช้น้ำของพืช

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นของสิ่งมีชีวิตแทบทุกชนิดสำหรับการปลูกข้าว น้ำนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นอันดับแรก ปริมาณการใช้น้ำของต้นพืช ก็คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดที่พืชใช้ในการเจริญเติบโตตลอดฤดูกาลเพาะปลูก ซึ่งปริมาณของน้ำดังกล่าวจะสูญเสียไปเนื่องจากการคายน้ำของพืช และการระเหยกลับสู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำ ปริมาณน้ำในส่วนที่พืชใช้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ และเนื้อเยื่อของพืช และกลับสู่บรรยากาศโดยการคายน้ำออกทางปากใบ

3.3.1 การระเหยของน้ำ

การระเหยเป็นการเปลี่ยนสภาพของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ โดยขบวนการแพร่กระจายของโมเลกุลของน้ำออกสู่บรรยากาศภายนอก ซึ่งในบริเวณที่ผิวน้ำสัมผัสกับอากาศ จะมีการแลกเปลี่ยนโมเลกุลของไอน้ำระหว่างอากาศและน้ำอยู่ตลอดเวลา การระเหย คืออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณไอน้ำ หรือ ปริมาณโมเลกุลของน้ำจากผิวน้ำสู่บรรยากาศ โดยปกติในการระเหยจะต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่งเพื่อให้เกิดขบวนการดังกล่าว พลังงานความร้อนที่ได้ก็คือ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

3.3.2 การคายน้ำของพืช

การคายน้ำของพืชคือ ขบวนการที่พืชนำน้ำที่พืชดูดขึ้นจากรากและผ่านขบวนการสังเคราะห์แสง ส่งกลับคืนสู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำ โดยการคายออกทางปากใบ อัตราการใช้ น้ำของพืชจะขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของพืช นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของพืชในช่วงอายุต่างๆ โดยปกติถ้าหากความชื้นภายในดินลดลง พืชก็จะลดอัตราการคายน้ำลง และขบวนการต่างๆภายในเซลล์ของต้นพืชก็จะน้อยลงตาม เช่น การสังเคราะห์แสง และการสร้างเนื้อเยื่อต่างๆเพื่อการเจริญเติบโต เป็นต้น จากสาเหตุดังกล่าว ถ้าหากความชื้นภายในดินยังลดลงต่อไปจนถึงจุดจุดหนึ่งที่พืชไม่สามารถนำน้ำจากดินขึ้นมาใช้ได้พืชก็จะเหี่ยว และตายในที่สุด ที่จุดจุดนี้เรียกว่า จุดเหี่ยวเฉา (Wiltng Point) การคายน้ำของพืชส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในตอนกลางวัน ซึ่งการคายน้ำของพืชจะน้อยในตอนเช้า และจะมีค่าเพิ่มขึ้นในตอนเที่ยง โดยจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอน้ำในใบของต้นพืช และไอน้ำในบริเวณนั้น ดังนั้นถ้าหากอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ อัตราการคายน้ำของพืชก็จะมากขึ้นตามลำดับ โดยสรุปปริมาณการคายน้ำของพืชจะขึ้นอยู่กับ ความชื้นภายในมวลดิน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และ การเคลื่อนที่ของมวลอากาศ

3.3.3 อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการระเหย

ขบวนการระเหยจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ อิทธิพลของลมฟ้าอากาศ และข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาบางอย่าง เช่น ปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาของชั่วโมงกลางวัน และความเร็วลม เป็นต้น ส่วนอิทธิพลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ สภาพของพื้นผิวที่เกิดการระเหย

อิทธิพลของลมฟ้าอากาศ ที่มีผลต่อการระเหยส่วนใหญ่ก็คือ ปริมาณความร้อนจากรังสีของแสงอาทิตย์ (Solar Radiation) ซึ่งเป็นตัวการที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการระเหย นอกจากนี้ตัวการอื่นที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยได้แก่ อุณหภูมิของอากาศ ความเร็วลม ความดันไอน้ำในอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ สภาพความครึ้มของเมฆฝน อัตราการระเหยจะขึ้นอยู่กับช่วงฤดูกาล ซึ่งจะมีความยาวของชั่วโมงกลางวันของแต่ละวันแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์

สภาพของพื้นผิวที่เกิดการระเหย ก็มีผลต่ออัตราการระเหย การระเหยจะเกิดขึ้นได้ดีสำหรับพื้นผิวที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมากๆ โดยปกติอัตราการระเหยจากผิวดินที่อิมตัวจะมีอัตราการระเหยใกล้เคียงกับ อัตราการระเหยจากผิวน้ำที่อยู่ใกล้เคียงกัน และมีอุณหภูมิเท่ากัน แต่อัตราการ

ระเหยจะลดลง เมื่อปริมาณของน้ำในเมล็ดดินเริ่มลดลง ในขณะที่อุณหภูมิของเมล็ดดินจะเริ่มสูงขึ้น เพื่อทำให้เกิดการระเหยของน้ำในเมล็ดดินได้ต่อไปอีก จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่งซึ่งจะเป็นสภาพสมดุล จะไม่เกิดการระเหยอีกต่อไป เนื่องจากปริมาณความร้อนจากภายนอกมีไม่พอที่จะทำให้เกิดการระเหยได้อีก เพราะแรงยึดตัวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับเมล็ดดินมีมากกว่า พลังงานที่จะทำให้โมเลกุลของน้ำหลุดออกสู่อากาศ นอกจากนี้อัตราการระเหยยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่มีอยู่ในน้ำอีกด้วย

3.3.4 สิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการคายน้ำของพืช

อัตราส่วนของน้ำที่พืชคายออก กับ น้ำในส่วนที่พืชนำไปใช้เพื่อสร้างเนื้อเยื่อ นั้นมีค่าสูงมาก ดังนั้นการคิดค่าปริมาณน้ำที่พืชใช้ จึงไม่นำเอาน้ำส่วนที่พืชเอาไปสร้างเป็นเนื้อเยื่อของต้นพืชมาคิด ปริมาณการใช้น้ำของพืช อัตราการคายน้ำของพืชจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ถ้าหากปริมาณน้ำในดินเพียงพอ และพื้นผิวดินปกคลุมด้วยหญ้า เนื่องจากการสังเคราะห์แสงต้องอาศัยแสงอาทิตย์ ดังนั้นการคายน้ำส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นในเวลากลางวัน นอกจากนี้อุณหภูมิก็มิผลต่อการคายน้ำของพืชเช่นกัน โดยที่เมื่ออุณหภูมิลดลง ขบวนการสังเคราะห์แสงของพืชก็จะลดลงด้วย ซึ่งถ้าหากอุณหภูมิของอากาศลดลงต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส พืชก็จะไม่สังเคราะห์แสงแล้ว

3.3.5 การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลภูมิอากาศ

เนื่องจากการวัด หรือการคำนวณการคายน้ำ และการระเหยทำได้ยาก เนื่องจากมีผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกมากมาย ดังนั้นได้มีผู้เสนอสมการสำหรับใช้คำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยอาศัยข้อมูลของภูมิอากาศของท้องถิ่น สูตรเหล่านี้จะอาศัยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาดังต่อไปนี้ อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์ และความครึ้มของเมฆ สมการที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช จะใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการที่จะเลือกใช้สูตรใดสูตรหนึ่ง จะต้องพิจารณาลักษณะของงาน และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่มีอยู่ สมการต่างๆที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชที่มีผู้เสนอ และจำนวนข้อมูลที่ต้องใช้ในสูตรได้สรุปไว้ในตารางที่ (3-6) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการของ เบนนี่ คริดดอล (Blaney

Criddle) และวิธีการของ เพนแมน (Penman)

1) วิธีการของ เบรนนี คริดดอล (1942) ได้เสนอสูตรสำหรับใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยอาศัยข้อมูลอุณหภูมิตามวิธีคือ ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความยาวนานของชั่วโมงกลางวัน ซึ่งสูตรของเบรนนี คริดดอล ได้แสดงไว้ดังนี้

$$U = PET = K (t.P)/100 \dots\dots\dots(3.3.1)$$

โดยที่ U (Potential Evapotranspiration) คือ ปริมาณการใช้น้ำของพืชตลอดฤดูเพาะปลูก

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของพืชแต่ละชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงฤดูกาลที่ทำการเพาะปลูก

F คือ แฟคเตอร์การใช้น้ำของพืช ซึ่งเท่ากับผลคูณของอุณหภูมิเฉลี่ย เป็นองศาฟาเรนไฮต์ กับเปอร์เซ็นต์ของชั่วโมงกลางวันใน 24 ชั่วโมง ตลอดฤดูเพาะปลูก

t คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเป็น องศาฟาเรนไฮต์

P คือ เปอร์เซ็นต์ของชั่วโมงกลางวันในช่วงฤดูกาลเพาะปลูก

สูตรของ เบรนนี คริดดอล จะมีจุดอ่อนอยู่มากเพราะข้อมูลที่ใช้ไม่ได้ครอบคลุมถึงผลกระทบอื่นที่มีผลต่อปริมาณการใช้น้ำของพืช ซึ่งผลกระทบอื่นที่มีผลปริมาณการใช้น้ำของพืชมีประเด็นที่สำคัญดังนี้คือ

1) อุณหภูมิของบรรยากาศ ไม่ได้เป็นตัวบ่งบอกถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำอย่างถูกต้อง เพราะแหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดการระเหยและการคายน้ำที่จริงมาจากรังสีของดวงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มิได้มีความสัมพันธ์กับ อุณหภูมิของบรรยากาศแต่อย่างใด ดังนั้นการพิจารณาอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวจึงไม่ถูกต้อง

2) ในประเทศที่อยู่ในเขตอบอุ่น ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศยังเย็นจัดอยู่ แต่บริเวณพื้นผิวโลกจะได้รับปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์มากกว่า ในช่วงที่เริ่มเปลี่ยนแปลงฤดูหนาวเข้าสู่ฤดูใบไม้ผลิ ทำให้ค่าอัตราการใช้น้ำของพืชที่เป็นจริงมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสูตร

3) ผลของความเร็วลมไม่ได้ถูกนำมาคิดเลย เพราะลมเป็นตัวพาความชื้นในอากาศได้ดี ดังนั้นจึงทำให้อัตราการใช้น้ำของพืชมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติ

ถึงแม้สูตรของ เบรนนี คริดดอล จะมีจุดอ่อนมากมาย แต่ก็เป็นที่นิยมใช้ในการคำนวณปริ

มาจากการใช้น้ำของพืชอย่างคร่าวๆ ทั้งนี้เพราะสูตรดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด อายุ ความสูง และความหนาแน่นในการปกคลุมพื้นผิว ถ้าหากมีการวัดปริมาณการใช้น้ำของพืชชนิดต่างๆอย่างถูกต้องในแต่ละพื้นที่แล้ว ก็จะสามารถที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของพืชชนิดนั้นๆได้อย่างถูกต้องเหมาะสมมากขึ้น การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชในพื้นที่ใกล้เคียง หรือบริเวณที่มีภูมิอากาศคล้ายคลึงกัน มักจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวเดียวกัน

2) วิธีการของ เพนแมน (1948) สูตรที่เขาเสนอได้รวมเอาพลังงานทั้งหมดที่ก่อให้เกิดการระเหยและการคายน้ำของพืชมาพิจารณา ซึ่งพลังงานที่กล่าวถึงก็คือ พลังงานเนื่องจากรังสีของดวงอาทิตย์ และพลังงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของลม

$$EP_p = PET = (\Delta Q_n + \gamma E_u) / (\Delta + \gamma) \dots\dots\dots(3.3.2)$$

เมื่อ EP_p (PET) คือ ปริมาณการใช้น้ำของพืชต่อวัน (มม./วัน)

คือ ความลาดชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวกับอุณหภูมิต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ

γ คือ Psychrometric Constant

มีค่า 0.49 เมื่ออุณหภูมิเป็นองศาเซนเซียส และความดันเป็น มม.ปรอท

มีค่า 0.27 เมื่ออุณหภูมิเป็นองศาฟาเรนไฮต์ และความดันเป็น มม.ปรอท

มีค่า 0.66 เมื่ออุณหภูมิเป็นองศาเซนเซียส และความดันเป็น มิลลิบาร์

Q_n คือ รังสีจากดวงอาทิตย์ (Net Solar Radiation) ซึ่งเทียบให้เป็นอัตราการระเหยของน้ำเป็น มม./วัน

สำหรับในกรณีที่ไม่มี การวัดปริมาณรังสีสุทธิจากดวงอาทิตย์ ค่า Q_n อาจประมาณได้จากสูตร

$$Q_n = Q (1-r) (0.18+0.55 n/N) - \sigma T^4 (0.56-0.0797 e_u) (0.10+0.90 n/N)$$

โดยที่ Q คือ รังสีจากดวงอาทิตย์ที่จะได้รับบนผิวโลกเมื่อไม่มีบรรยากาศปกคลุม ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าละติจูด และฤดูกาล โดยเทียบให้อัตราการระเหยของน้ำเป็น มม./วัน (ดูจากตารางที่ (3 - 5))

r คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) เป็นอัตราส่วนระหว่าง

รังสีดวงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับออกไป โดยมีค่า 0.05 สำหรับผิวน้ำ 0.01 สำหรับดินเปียกที่ไม่มีพืชปกคลุม และ 0.20 สำหรับพื้นที่ที่มีพืชขึ้นปกคลุมเต็ม

n/N คือ อัตราส่วนของระยะเวลาที่ได้รับแสงแดดจริง กับระยะเวลาที่มีแสงแดดนานที่สุดที่เกิดขึ้นได้ในช่วงเวลานั้น

คือ Stefan - Boltzman Constant

T คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ของอากาศ

σT^4 คือ รังสีที่สะท้อนออกจากวัตถุที่มีสีดำสนิท (Radiant Emittance) แปลงให้เป็นหน่วย มม./วัน (ดูจากตารางที่ (3 - 6))

e_a คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศ

e_s คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ (ความชื้นสัมพัทธ์) (e_a)

E_a คือ ปริมาณการระเหยของน้ำเนื่องจากการเคลื่อนไหวของอากาศ มม./วัน

$$\text{โดยที่ } E = 0.262(e_a - e_s)(1 + 0.0062U_2)$$

U_2 คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับเหนือพื้นดิน 2 เมตร (กม./วัน)

ถ้าหากไม่มีการวัดความเร็วลมที่ระดับความสูง 2 เมตรก็อาจดัดแปลงค่าความเร็วลมที่วัดได้ในระดับอื่นมาเป็นค่าความเร็วที่ระดับ 2 เมตรโดยใช้สูตร

$$U_2 = U_1(\log 2 / \log H)$$

เมื่อ U_1 คือ ค่าความเร็วลมที่ระดับเหนือพื้นดิน H เมตร (กม./วัน)

ตารางที่ (3-5) รังสีแสงอาทิตย์ที่ขึ้นบนของบรรยากาศ มีหน่วยเทียบเท่ากับความลึกการระเหยของ
น้ำที่ 20 องศาเซลเซียส เป็น มม./วัน

Latitude	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
60°N	1.44	3.53	6.99	11.24	14.79	16.52	15.66	12.61	8.66	4.65	1.92	0.97
50	3.76	5.98	9.23	12.80	15.57	16.76	16.16	13.85	10.56	7.13	4.36	3.11
45	4.96	7.18	10.26	13.45	15.84	16.83	16.30	14.35	11.44	8.29	5.59	4.27
40	6.17	8.35	11.22	14.02	16.03	16.84	16.39	14.76	12.23	9.37	6.80	5.46
35	7.40	9.48	12.08	14.49	16.13	16.76	16.39	15.08	12.94	10.37	8.00	6.68
30	8.62	10.53	12.85	14.87	16.14	16.59	16.30	15.30	13.56	11.29	9.14	7.91
25	9.81	11.52	13.52	15.15	16.05	16.32	16.12	15.42	14.08	12.12	10.24	9.13
20	10.94	12.44	14.09	15.32	15.85	15.95	15.84	15.43	14.48	12.89	11.29	10.33
15	11.99	13.25	14.56	15.37	15.55	15.48	15.46	15.32	14.77	13.60	12.27	11.49
10	12.95	13.97	14.91	15.30	15.14	14.92	14.97	15.11	14.94	14.22	13.18	12.58
5°N	13.83	14.58	15.15	15.11	14.63	14.12	14.38	14.79	15.00	14.73	13.99	13.59
0	14.62	15.08	15.26	14.81	14.03	13.54	13.69	14.36	14.96	15.09	14.70	14.50
5°S	15.30	15.49	15.25	14.42	13.33	12.71	12.92	13.83	14.78	15.30	15.31	15.29
10	15.89	15.81	15.31	13.91	12.55	11.81	12.07	13.19	14.52	15.40	15.83	15.98
15	16.40	15.93	14.90	13.30	11.69	10.83	11.14	12.45	14.14	15.40	16.25	16.57
20	16.81	16.03	14.57	12.59	10.75	9.79	10.15	11.63	13.65	15.32	16.55	16.98
25	17.12	16.03	14.15	11.78	9.74	8.71	9.10	10.79	13.05	15.16	16.74	17.38
30	17.32	15.91	13.62	10.89	8.67	7.58	8.00	9.83	12.37	14.89	16.80	17.66
35	17.43	15.66	12.98	9.90	7.54	6.41	6.86	8.82	11.60	14.52	16.77	17.84
40	17.38	15.28	12.22	8.85	6.39	5.24	5.70	7.77	10.74	14.02	16.64	17.91
50°S	17.11	14.17	10.39	6.77	4.17	3.04	3.41	5.14	8.73	12.65	16.14	17.74

Computed from "Table 6 - Solar Radiation, R, at Top of Atmosphere in Units of Equivalent Evaporation at 20°C in inches." in Pan Evaporation and Evapotranspiration from Climatic Data. J.E. Christiansen J. Irrigation and Drainage Division, ASCE Vol. 94. June, 1968 pp. 256.

ตารางที่ (3-6) ค่า Radiant Emittance มีหน่วยเป็นความลึกของน้ำ เป็น มม.ต่อวัน

Temp °C	ϵT^4 mm/day	Temp °C	ϵT^4 mm/day	Temp °C	ϵT^4 mm/day
0	11.21	17	14.28	34	17.93
1	11.38	18	14.48	35	18.17
2	11.55	19	14.68	36	18.41
3	11.72	20	14.88	37	18.64
4	11.89	21	15.08	38	18.89
5	12.06	22	15.29	39	19.13
6	12.23	23	15.50	40	19.38
7	12.41	24	15.71	41	19.63
8	12.59	25	15.92	42	19.88
9	12.77	26	16.14	43	20.13
10	12.95	27	16.35	44	20.39
11	13.13	28	16.57	45	20.65
12	13.32	29	16.79	46	20.91
13	13.51	30	17.02	47	21.17
14	13.70	31	17.24	48	21.44
15	13.89	32	17.47	49	21.70
16	14.08	33	17.70	50	21.98

* Computed from Table 129-B, Smithsonian Meteorological Tables by R.J. List, Smithsonian Miscellaneous Collections, Vol. 114 pp. 413, 1966

** Heat of vaporization was assumed to be constant at 580 cal/gm. of H₂O

ตารางที่ (3-7) ความดันไอน้ำอิ่มตัวเหนือผิวน้ำ มีหน่วยเป็น มม.ต่อวัน

T ^o C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	6.11	6.15	6.20	6.24	6.29	6.33	6.38	6.42	6.47	6.52
1	6.57	6.61	6.66	6.71	6.76	6.81	6.85	6.90	6.95	7.00
2	7.05	7.10	7.16	7.21	7.26	7.31	7.36	7.41	7.47	7.52
3	7.57	7.63	7.68	7.74	7.79	7.85	7.90	7.96	8.01	8.07
4	8.13	8.19	8.24	8.30	8.36	8.42	8.48	8.54	8.60	8.66
5	8.72	8.78	8.84	8.90	8.96	9.03	9.09	9.15	9.22	9.28
6	9.35	9.41	9.48	9.54	9.61	9.67	9.74	9.81	9.88	9.94
7	10.01	10.08	10.15	10.22	10.29	10.36	10.43	10.50	10.58	10.65
8	10.72	10.79	10.87	10.94	11.02	11.09	11.17	11.24	11.32	11.40
9	11.47	11.55	11.63	11.71	11.79	11.87	11.95	12.03	12.11	12.19
10	12.27	12.35	12.44	12.52	12.61	12.69	12.77	12.86	12.95	13.03
11	13.12	13.21	13.29	13.38	13.47	13.56	13.65	13.74	13.83	13.92
12	14.02	14.11	14.20	14.30	14.39	14.49	14.58	14.68	14.77	14.87
13	14.97	15.07	15.17	15.27	15.36	15.47	15.57	15.67	15.77	15.87
14	15.98	16.08	16.19	16.29	16.40	16.50	16.61	16.72	16.83	16.93
15	17.04	17.15	17.26	17.38	17.49	17.60	17.71	17.83	17.94	18.06
16	18.17	18.29	18.41	18.52	18.64	18.76	18.88	19.00	19.12	19.24
17	19.37	19.49	19.61	19.74	19.86	19.99	20.12	20.24	20.37	20.50
18	20.63	20.76	20.89	21.02	21.15	21.29	21.42	21.56	21.69	21.83
19	21.96	22.10	22.24	22.38	22.52	22.66	22.80	22.94	23.08	23.23
20	23.37	23.52	23.66	23.81	23.96	24.11	24.26	24.41	24.56	24.71
21	24.86	25.01	25.17	25.32	25.48	25.63	25.79	25.95	26.11	26.27
22	26.43	26.59	26.75	26.92	27.08	27.25	27.41	27.58	27.75	27.92
23	28.09	28.26	28.43	28.60	28.77	28.95	29.12	29.30	29.47	29.65
24	29.83	30.01	30.19	30.37	30.55	30.74	30.92	31.11	31.29	31.48

จาก : อภิชาติ อมกุลอำไพ, [24]

ตารางที่ (3-7 ต่อ) ความดันไออิ่มตัวเหนือผิวน้ำ มีหน่วยเป็น มม.

T°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
25	31.67	31.86	32.05	32.24	32.43	32.63	32.82	33.02	33.21	33.41
26	33.61	33.81	34.01	34.21	34.41	34.61	34.82	35.02	35.23	35.44
27	35.65	35.86	36.07	36.28	36.49	36.71	36.92	37.14	37.36	37.58
28	37.80	38.02	38.24	38.46	38.69	38.91	39.14	39.36	39.59	39.82
29	40.05	40.29	40.52	40.75	40.99	41.23	41.47	41.70	41.94	42.19
30	42.43	42.67	42.92	43.17	43.41	43.66	43.91	44.16	44.42	44.67
31	44.93	45.18	45.44	45.70	45.96	46.22	46.49	46.75	47.02	47.28
32	47.55	47.82	48.09	48.36	48.64	48.91	49.19	49.47	49.74	50.02
33	50.31	50.59	50.87	51.16	51.45	51.74	52.03	52.32	52.61	52.90
34	53.20	53.50	53.80	54.10	54.40	54.70	55.00	55.31	55.62	55.93
35	56.24	56.55	56.86	57.18	57.49	57.81	58.13	58.45	58.77	59.10
36	59.42	59.75	60.08	60.41	60.74	61.07	61.41	61.74	62.08	62.42
37	62.76	63.10	63.45	63.80	64.14	64.49	64.84	65.20	65.55	65.91
38	66.26	66.62	66.98	67.35	67.71	68.08	68.45	68.81	69.19	69.56
39	69.93	70.31	70.69	71.07	71.45	71.83	72.22	72.60	72.99	73.38
40	73.78	74.17	74.57	74.97	75.36	75.77	76.17	76.57	76.98	77.39
41	77.80	78.21	78.63	79.05	79.46	79.88	80.31	80.73	81.16	81.58
42	82.01	82.45	82.88	83.32	83.75	84.19	84.64	85.08	85.52	85.97
43	86.42	86.87	87.33	87.78	88.24	88.70	89.16	89.63	90.09	90.56
44	91.03	91.51	91.98	92.46	92.94	93.42	93.90	94.39	94.87	95.36
45	95.85	96.35	96.84	97.34	97.84	98.35	98.85	99.36	99.87	100.38
46	100.89	101.41	101.93	102.45	102.97	103.50	104.03	104.56	105.09	105.62
47	106.16	106.70	107.24	107.78	108.33	108.88	109.43	109.98	110.54	111.10
48	111.66	112.22	112.79	113.36	113.93	114.50	115.07	115.65	116.23	116.81
49	117.40	117.99	118.58	119.17	119.77	120.37	120.97	121.57	122.18	122.79
50	123.40	124.01	124.63	125.25	125.87	126.49	127.12	127.75	128.38	129.01

จาก : อภิชาติ อบุญลอำไพ, [24]