

หุ่นยนต์สำรวจความหนาของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม

รังสรรค์ บุญนรา¹⁾ เอกลักษณ์ เครือยศ¹⁾ ประสิทธิ์พร พงศ์วสิน¹⁾ และ ดร.ภวิดา มณีวรรณ²⁾

- 1) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- 2) สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคพื้นสนาม(FIBO)มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Email: praw@fibo.kmutt.co.th

บทคัดย่อ

ถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมที่เมื่อมีใช้งานไปนานๆแล้วมักเกิดการสึกกร่อน ซึ่งจะทำให้ถังน้ำมันปิโตรเลียมมีการรั่วซึมได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมที่เพื่อให้แน่ใจว่ามีความปลอดภัย การตรวจสอบความหนาผนังถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมที่มักใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้อุปกรณ์ตรวจสอบพื้นผิวแบบอัลตราโซนิก การตรวจสอบโดยใช้คนอาจทำให้การตรวจสอบครอบคลุมไม่ทั่วถึงหรือได้ค่าความหนาที่ไม่ถูกต้อง ใช้เวลาในการตรวจสอบที่ยาวนาน และเสียค่าใช้จ่ายที่สูง จึงได้มีการสร้างหุ่นยนต์ขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบแทนการใช้คน หุ่นยนต์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้นจะสามารถตรวจสอบการสึกหรือความหนาของผนังของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมโดยอัตโนมัติ ข้อมูลของการตรวจสอบจะถูกส่งผ่านมายังอุปกรณ์บันทึกข้อมูลบนภาคพื้นดิน ผู้ควบคุมสามารถควบคุมหุ่นยนต์ทางไกลได้ผ่านทางสายสัญญาณ ลักษณะของโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์นั้นจะมีความทำงานหลักคือ การเคลื่อนที่ไปในแนวคิงโดยจะยึดเกาะกับผนังของถังด้วยแรงยึดเกาะจากล้อแม่เหล็กถาวรห้าล้อซึ่งวางเรียงกันเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านรอยเชื่อมได้โดยสามารถรักษาหัวอัลตราโซนิกโพรบให้แนบกับผนังถังได้ตลอดการเคลื่อนที่ ซึ่งลักษณะของล้อทั้งหมดจะยึดกับจุดหมุนบนตัวหุ่นทำให้เคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกันซึ่งเมื่อล้อใดล้อหนึ่งวิ่งผ่านรอยเชื่อมล้อที่เหลือยังคงสัมผัสกับพื้นของผนังโลหะ ทำให้หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลได้ไม่เกิดการดีดกลับหลัง

1. ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม (Storage-Tank) ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมนั้นเมื่อใช้งานไปนานๆจะเกิดการสึกหรือ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดภายในถังและ เกิดจากการกัดกร่อนเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมีของก๊าซ กับโลหะภายในและภายนอกของถัง ซึ่งหากเกิดการรั่วซึมอาจทำให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตและวัสดุอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ซึ่งก็จะทำให้เกิดความสูญเสีย

ทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้นจึงทำให้ต้องมีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ การตรวจสอบความหนาถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมในปัจจุบันประเทศไทยของเรานั้นยังมีการใช้แรงงานคนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในการสำรวจโดยใช้คนจะมีปัญหาในเรื่องของความปลอดภัยของคนที่จะเข้าไปตรวจสอบที่อาจจะได้รับอันตรายจากการปีนป่ายหรือ จากการสูดดมก๊าซที่บรรจุในถัง นอกจากนี้การตรวจสอบขนาดความหนาของผนังของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมโดยใช้คนอาจทำ

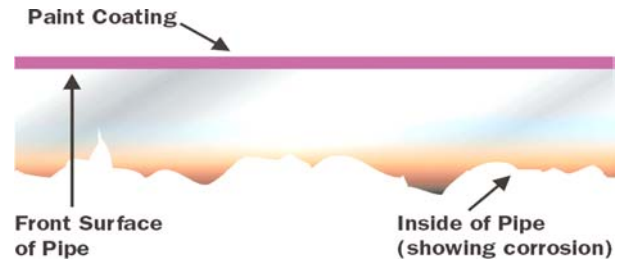
ให้การตรวจสอบครอบคลุมไม่ทั่วถึงหรือได้ค่าความหนาที่ไม่ถูกต้อง ใช้เวลาในตรวจสอบที่ยาวนานและเสียค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นและประดิษฐ์หุ่นยนต์ที่ใช้ในการสำรวจถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม แทนการตรวจสอบด้วยคน การใช้หุ่นยนต์ตรวจสอบความหนาของถังจะมีประสิทธิภาพสูงและได้ค่าการวัดความของผนังที่แม่นยำ

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวตั้ง บนผนังโลหะ
2. เพื่อพัฒนาหุ่นยนต์สำหรับใช้ในการตรวจสอบการสึกหรอความหนาของผนังของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม โดยอัตโนมัติ
3. เพื่อลดการนำเข้ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการสำรวจถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม จากต่างประเทศ

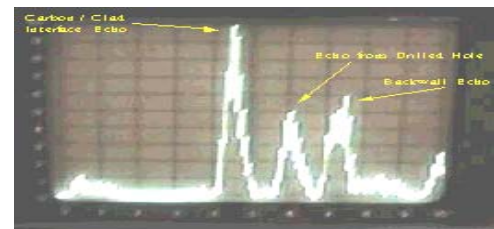
3. การตรวจสอบพื้นผิวด้วยเครื่องอัลตราโซนิก

อัลตราโซนิก เทสติ้ง (Ultrasonic Testing) เป็นเครื่องมือทดสอบชนิดไม่ทำลายพื้นผิว โดยการใช้การส่งความถี่สูงของคลื่นเสียงไปยังงานที่ต้องการตรวจสอบ พลังงานที่ส่งนี้จะผ่านชิ้นงานไปได้ โดยมีการสูญเสียเล็กน้อย เว้นแต่จะไปกระทบเข้ากับจุดบกพร่องหรือรอยแตก (Defect or Flaw) ในเนื้อโลหะซึ่งจะทำให้เกิดการสะท้อนและเสียพลังงานไป ทรานสดิวเซอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับเอาพลังงานสะท้อนกลับจากการที่ไปกระทบเข้ากับจุดบกพร่องหรือรอยแตก และจะส่งผลการรับไปยังจอภาพออสซิลโลสโคป (Oscilloscope Screen) ที่จอภาพนี้จะปรากฏให้เห็นสัญญาณ ขณะที่คลื่นเสียงไปกระทบกับผิวงานในตอนแรก สัญญาณของจุดบกพร่องและสัญญาณที่คลื่นเสียงไปกระทบผิวงานส่วนล่างสุดพร้อมๆ กัน



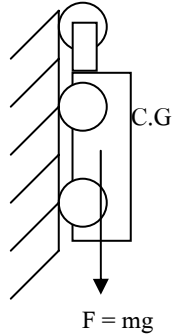
รูปที่ 1 แสดงหลักการของการทดสอบด้วยอัลตราโซนิก

จากรูปที่ 1 แสดงหลักการของการทดสอบด้วยอัลตราโซนิก ซึ่งความเข้มของสัญญาณจะปรากฏออกมาให้เห็นในลักษณะแนวตั้ง (Vertical Deflection) และช่วงระยะที่เกิดสัญญาณอื่นๆ ปรากฏออกมาเป็นเส้นตามนอน (Horizontal Deflection) ฉะนั้นขนาดของรอยบกพร่องสามารถพิจารณาได้จากการวัดความสูงของสัญญาณ และตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องนั้นๆ สามารถพิจารณาได้โดยการวัดระยะของเส้นตามนอน จะเห็นว่าการสะท้อนของสัญญาณอันหน้าและอันหลังจะปรากฏที่ขอบสุดของจอภาพ ส่วนสัญญาณสะท้อน (Echo) ของจุดบกพร่องจะอยู่ในระหว่างสัญญาณทั้งสอง



รูปที่ 2 แสดงการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยการทดสอบแบบอัลตราโซนิก

4. แรงที่กระทำกับตัวหุ่นยนต์



รูปที่ 3 แสดงแรงที่กระทำกับตัวหุ่นยนต์

แรงที่กระทำกับหุ่นยนต์สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$F = mg \quad \dots\dots\dots(1)$$

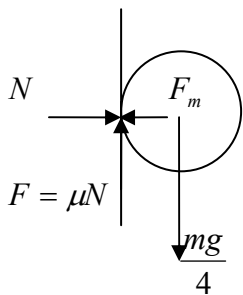
เมื่อ F คือ แรงที่กระทำกับตัวหุ่นยนต์

m คือ มวลของหุ่นยนต์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15 Kg

g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

แทนค่าต่างๆลงในสมการจะได้ $F = 147.15 \text{ N}$

5. แรงที่กระทำกับล้อแต่ละล้อ



รูปที่ 4 แสดงแรงที่กระทำกับล้อในสภาวะสมดุล

$$\sum F_y = 0$$

$$F - \frac{mg}{4} = 0 \quad \dots\dots (2)$$

$$\mu N = \frac{mg}{4} \quad \dots\dots (3)$$

จะได้
$$N = \frac{mg}{4\mu} \quad \dots\dots(4)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งมีค่า 0.4
แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (4) จะได้

$$N = \frac{15 \times 9.81}{4 \times 0.4}$$

$$= 91.97 \text{ N}$$

หมายเหตุ การที่คิดแรงที่กระทำกับล้อเพียงแค่ 4 ล้อ เพราะเมื่อมีล้อหนึ่งล้อใดเคลื่อนที่อยู่บนรอยเชื่อม ล้อที่เหลือ 4 ล้อ จะยังคงสัมผัสกับผนังโลหะอยู่ ทำให้ต้องพิจารณาแรงยึดเกาะของล้อมากที่สุดที่ต้องการจากกรณีที่หุ่นยนต์มีการยึดเกาะเพียงแค่ 4 ล้อ

$$\sum F_x = 0$$

$$N - F_m = 0 \quad \dots\dots (5)$$

$$N = F_m \quad \dots\dots (6)$$

เมื่อ F_m คือ แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็ก, N

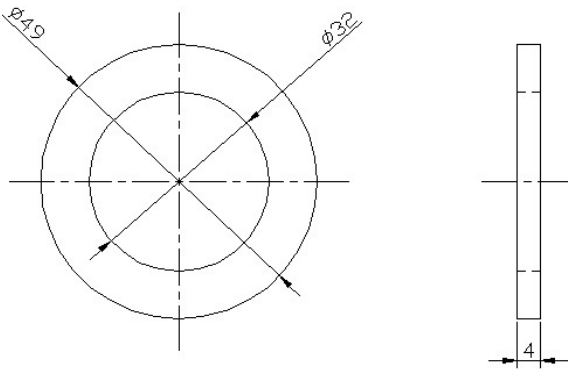
แทนค่า N ลงในสมการที่ (6) จะได้

$$F_m = 91.97 \text{ N}$$

จากแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กที่หาได้ สามารถนำไปหาวัสดุแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติตามที่เราต้องการได้

6. ลักษณะของล้อแม่เหล็ก

ลักษณะของล้อแม่เหล็ก ที่เป็นวัสดุแม่เหล็ก
จำพวก Rare-Earth-Alloy ซึ่งมีความเข้มของ
สนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กแบบ hard อื่นๆ กล่าวคือจะ
มีค่า $(BH)_{\max}$ และค่า Coercivities ที่สูง



รูปที่ 5 แสดงลักษณะของล้อแม่เหล็ก

ซึ่งแรงยึดเกาะของแม่เหล็กสามารถหาได้จาก

$$F'_m = F_m \times f_s \quad \dots\dots\dots (7)$$

F'_m คือ แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กที่คูณค่า Safety factor
แล้ว, N

F_m คือ แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็ก, N ซึ่งมีค่า 73.58 N

f_s คือ Safety factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (7) จะได้

$$\begin{aligned} F'_m &= 91.97 \times 2 \\ &= 183.94 \text{ N} \end{aligned}$$

ซึ่งแรงยึดเกาะของแม่เหล็กสามารถหาได้จาก

$$F'_m = \frac{(BH)_{\max} \times V_{\text{wheel}}}{L_m} \quad \dots\dots\dots (8)$$

เมื่อ $(BH)_{\max}$ คือ Maximum Energy Product ของวัสดุที่
ใช้ทำแม่เหล็ก, kJ/m^3

F'_m คือ แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กที่คูณ ค่า
Safety factor แล้ว ซึ่งมีค่า 183.936 N

V_{wheel} = ปริมาตรของล้อแม่เหล็ก, m^3

L_m = ความกว้างของล้อแม่เหล็ก, ซึ่งมีค่า 4 mm

และสามารถหาปริมาตรของล้อแม่เหล็ก (V_{wheel}) ได้จาก

$$V_{\text{wheel}} = \left[\frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \times L_m \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

เมื่อ D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก, มีค่า 49 mm

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, มีค่า 32 mm

แทนค่าลงในสมการที่ (9) จะได้

$$V_{\text{wheel}} = 4.326 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

และจาก $(BH)_{\max} = \frac{F'_m \times L_m}{V_{\text{wheel}}}$

แทนค่าจะได้ $(BH)_{\max} = 136.07 \text{ kJ/m}^3$

จากค่า Maximum energy product, $(BH)_{\max}$ ที่
คำนวณได้นั้นสามารถนำไปเลือกวัสดุและองค์ประกอบที่
จะนำมาทำล้อแม่เหล็กได้

จากค่า Maximum energy product, $(BH)_{\max}$ ที่
คำนวณได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 136.07 kJ/m^3 นั้นเราสามารถ
เลือกวัสดุและองค์ประกอบจาก Catalog ของบริษัทผู้ผลิต

จากค่า Maximum energy product, $(BH)_{\max}$ ที่เลือกใช้มีค่า 263 kJ/m³ เรานำมาหาค่าของแรงดึงดูด (F'_m) ใหม่ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (8) จะได้

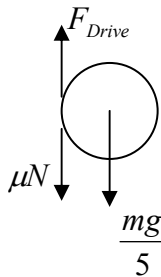
$$F'_m = \frac{(BH)_{\max} \times V_{\text{wheel}}}{L_m}$$

$$= \frac{263 \times (4.326 \times 10^{-6})}{0.004}$$

$$= 0.284 \text{ kN}$$

$$= 284 \text{ N}$$

หา Torque สูงสุดที่สามารถขับเคลื่อนล้อได้จาก



รูปที่ 6 แสดง Free Body Diagram เพื่อหา Torque ในการขับเคลื่อนล้อ

$$T = F \times R \quad \dots\dots\dots (10)$$

เมื่อ $F = \mu N + \frac{mg}{5} \quad \dots\dots\dots (11)$

แทนค่าสมการที่ (11) ลงในสมการที่ (10) จะได้

$$T = \left(\mu N + \frac{mg}{5} \right) \times R \quad \dots\dots\dots (12)$$

เมื่อ F_{Drive} คือ แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อ

T คือ Torque สูงสุดที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อ, N.m

μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งมีค่า 0.4

N คือ แรงที่กระทำในแนวตั้งฉาก, N

R คือ รัศมีของล้อแม่เหล็ก, m ซึ่งมีค่า 0.0245 m

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (12) จะได้

$$T = [(0.4 \times 284) + 29.43] \times 0.0245$$

$$= 3.5 \text{ N.m}$$

เพราะฉะนั้น Torque ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแต่ละล้อมีค่า 3.5 N.m

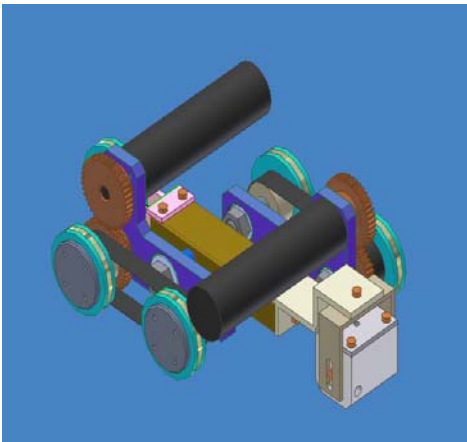
7. ลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์สำรวจตั้งบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม

โดยลักษณะของโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์นั้นจะมีการทำงานหลักคือ การเคลื่อนที่ไปในแนวตั้งโดยจะยึดเกาะกับผนังของถังด้วยแรงยึดเกาะจากแม่เหล็กถาวรของล้อหุ่นยนต์ การเลือกล้อให้เป็นแม่เหล็กถาวรนั้นจะมีข้อได้เปรียบกว่าล้อที่เป็นแม่เหล็กชั่วคราวคือ แม่เหล็กถาวรจะไม่มีการสูญเสียเนื่องจากความร้อนในขดลวดและการสูญเสียพลังงานในการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ในการยึดเกาะกับผนังของถังเพื่อที่จะทำการเก็บข้อมูล ที่หุ่นยนต์จะมีการใช้ Ultrasonic sensor ในการตรวจสอบหาความหนาและรอยร้าวของผนังบรรจุก๊าซไปขณะเคลื่อนที่ ซึ่งในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งนั้น Ultrasonic Sensor จะทำงานร่วมกับ Microcontroller MCS-51 และ Encoder ในการเก็บข้อมูลจากการตรวจสอบเป็นระยะอย่างแม่นยำหลังจากนั้นจะส่งข้อมูลมาเก็บที่หน่วยบันทึกผลหลักต่อไป การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้นจะเป็นการขับเคลื่อนด้วย DC-Servo Motor 2 ตัว

โดยมีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองด้วย Microcontroller MCS-51 การส่งกำลังนั้นจะใช้ระบบเฟืองเป็นตัวส่งกำลังไปยังล้อหน้าและล้อหลัง ซึ่งระบบเฟืองนั้นจะมีความแม่นยำในการส่งกำลังและไม่เกิดการสลิป

8. การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ลักษณะของตัวหุ่นยนต์สำรวจถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม นั้นคือ จะใช้ล้อที่เป็นแม่เหล็กถาวร จำนวน 5 ล้อ มีการจัดวางล้อให้เอียงกันจำนวน 4 ล้อและล้อหน้าอีก 1 ล้อซึ่งจะอยู่ด้านหน้าของหุ่นยนต์ ตามรูปที่ 3 โดยการวางล้อในลักษณะนี้ก็เนื่องจากลักษณะของถังนั้นจะมีแนวการเชื่อมต่อระหว่างโลหะแต่ละแผ่นที่มีลักษณะนูนขึ้นมา โดยล้อจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ซึ่งล้อแต่ละชุดจะประกอบด้วย DC Servo Motor จำนวน 1 ตัว ล้อที่ทำมาจากวัสดุแม่เหล็กถาวรจำนวน 2 ล้อ และชุด pulley สายพาน 1 ชุด



รูปที่ 7 แสดงลักษณะจำลองโครงสร้างของหุ่นยนต์

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าลักษณะของโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์นั้นจะมีการทำงานหลักคือ การเคลื่อนที่ไปในแนวตั้งโดยจะยึดเกาะกับผนังของถังด้วยแรงยึดเกาะจากล้อแม่เหล็กถาวรห้าล้อซึ่งวางเอียงกันเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านรอยเชื่อมได้โดยสามารถรักษาหัวอูลตราโซนิคโพรบ

ให้แนบกับผนังถังได้ตลอดการเคลื่อนที่ ซึ่งลักษณะของล้อทั้งหมดจะยึดกับจุดหมุนบนตัวหุ่นทำให้เคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกันซึ่งเมื่อล้อใดล้อหนึ่งวิ่งผ่านรอยเชื่อมล้อที่เหลือยังคงสัมผัสกับพื้นของผนังโลหะ ทำให้หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลได้ไม่เกิดการตีลังกากลางหลัง



รูปที่ 8 ลักษณะและรายละเอียดชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ตรวจสอบความหนาของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมโดยใช้อัลตราโซนิค

9. สรุป

เหตุผลที่มีการจัดสร้างหุ่นยนต์ตรวจสอบความหนาของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมโดยใช้อัลตราโซนิค ตัวนี้ขึ้นมา ก็เพื่อที่จะเข้าไปแก้ปัญหาในการตรวจสอบความหนาของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งในปัจจุบันยังคงใช้แรงงานคนเป็นส่วนใหญ่ โดยใช้คนโหนสลิงขึ้นไปตรวจสอบซึ่งอาจตกลงมาได้รับอันตรายถึงชีวิตได้ หรือไม่ค่าที่ได้จากตรวจสอบอาจไม่ถูกต้องแม่นยำ แต่ถ้าใช้หุ่นยนต์ในการตรวจสอบนั้นจะมีความแม่นยำมากขึ้น เพราะหุ่นยนต์มีความเร็วในการเคลื่อนที่คงที่ หุ่นยนต์ตรวจสอบความหนาของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมที่ได้จัดสร้างขึ้นมา มีความสามารถในการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวตั้ง โดยที่ตัว

ของหุ่นยนต์ยึดเกาะอยู่กับผนังด้านนอกของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม และสามารถตรวจสอบหาความหนาของโลหะที่ใช้ทำถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียมโดยการส่งคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปยังพื้นผิวของโลหะที่ต้องการหาจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น หัวอัลตราโซนิกจะถูกติดตั้งไว้ที่ด้านหลังของหุ่นยนต์ ซึ่งจะยึดติดอยู่กับชุดติดตั้งหัวอัลตราโซนิก ลักษณะของชุดติดตั้งหัวอัลตราโซนิกจะมีลักษณะเหมือนกล่องสี่เหลี่ยม แต่ฐานข้างล่างของกล่องจะมีลักษณะเป็นสกีและเจาะรูเป็นทรงกระบอกตามขนาดของหัวอัลตราโซนิก เพื่อติดตั้งหัวอัลตรา-โซนิกที่ใช้ในการตรวจสอบ และภายในชุดติดตั้งหัวอัลตราโซนิกจะมีรูที่เป็นช่องทางให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ เพื่อที่จะทำหน้าที่เป็นฟิล์มระหว่างหัวอัลตราโซนิกกับผิวของผนังถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม เหตุผลที่ต้องมีน้ำเป็นฟิล์มก็เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างหัวอัลตราโซนิกกับผิวของผนังถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม หุ่นยนต์ตรวจสอบความหนาของถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม จะถูกออกแบบให้มีความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.04 เมตรต่อวินาที หรือ 4 เซนติเมตรต่อวินาที และสามารถควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ได้เป็นระยะทางไกล 22 เมตร โดยจะควบคุมด้วย Microcontroller MCS-51 หุ่นยนต์ประกอบด้วยล้อยี่ทั้งหมด 5 ล้อ และหุ่นยนต์นั้นสามารถที่จะวิ่งข้ามรอยเชื่อมโดยที่ล้อยี่ทั้งหมดยังคงสัมผัสกับพื้นตลอดเวลาและไม่หลุดตก ซึ่งล้อยี่จะเป็นแม่เหล็กถาวรมีค่าความเป็นสนามแม่เหล็กที่ 263 kJ/m³ จากการทดสอบในการปฏิบัติงานจริงพบว่าหุ่นยนต์สามารถรับน้ำหนักได้ถึง 20 กิโลกรัม และรับโมเมนต์สูงสุดได้ 4 นิวตันเมตร โดยที่หุ่นยนต์ไม่เกิดการดีลิ่งกาหงายหลัง ความเร็วเฉลี่ยที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งมีความเร็ว 4.42 เซนติเมตรต่อวินาที และความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ลงมีความเร็ว 5.32 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ตรวจสอบความหนาโลหะโดยใช้อัลตราโซนิก

10. กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาวิจัยหุ่นยนต์สำรวจถังบรรจุน้ำมันปิโตรเลียม ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการอุตสาหกรรมสำหรับปริญญาตรี ประจำปี 2546 และได้รับความร่วมมือจากบริษัทควอลิเทคจำกัดในการให้ข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบหุ่นยนต์

11. เอกสารอ้างอิง

1. จำรูญ ดันติพิศาลกุล, 2545, การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1, พิมพ์ ครั้งที่ 3 บริษัท เอสอาร์ พรินติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด
2. จำรูญ ดันติพิศาลกุล, 2542, การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1, พิมพ์ ครั้งที่ 1 หจก.เม็ดทราย พรินติ้ง
3. ชีรวัดน์ ประกอบผล, 2545, การโปรแกรมภาษาซีสำหรับงานวิทยาศาสตร์, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)
4. Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill Book company, 1963