

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศ

3.1 บทนำ

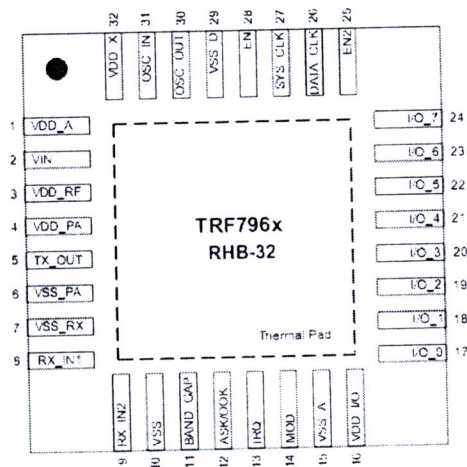
บทนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศโดยการวิเคราะห์และการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศ โดยสายอากาศที่ทำการออกแบบจะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีคุณสมบัติในการกระจายสนามแม่เหล็กที่ดีโดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์เชิงเส้น ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวและค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรทั้งสามแนวแกนหลักให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งาน โดยรูปแบบของสายอากาศที่นำมาวิเคราะห์จะเป็นลวดตัวนำเส้นเดียวจัดวางเป็นบ่วงเกลียวสี่เหลี่ยมจัตุรัสซ้อนกัน 3 บ่วง โดยสายอากาศแต่ละแบบถูกกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างบ่วงที่ต่างกัน จุดประสงค์เพื่อดูผลการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กของสายอากาศแต่ละแบบเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นได้ใช้โปรแกรม NEC มาทำการวิเคราะห์

3.2 การออกแบบเครื่องอ่าน RFID ในย่านความถี่ HF

ในโครงการวิจัยนี้จะทำการออกแบบเครื่องอ่าน RFID ที่ย่านความถี่ใช้งาน 13.56 MHz หรือย่าน HF โดยการใช้ชิพ IC เบอร์ TRF7690/91 ของบริษัท Texas Instruments ซึ่ง IC ตัวนี้จะทำการติดต่อสื่อสารกับแท็ก RFID ด้วยความถี่ 13.56 MHz แล้วส่งข้อมูลที่อ่านได้ออกมา โดย IC ตัวดังกล่าวมีคุณสมบัติดังนี้

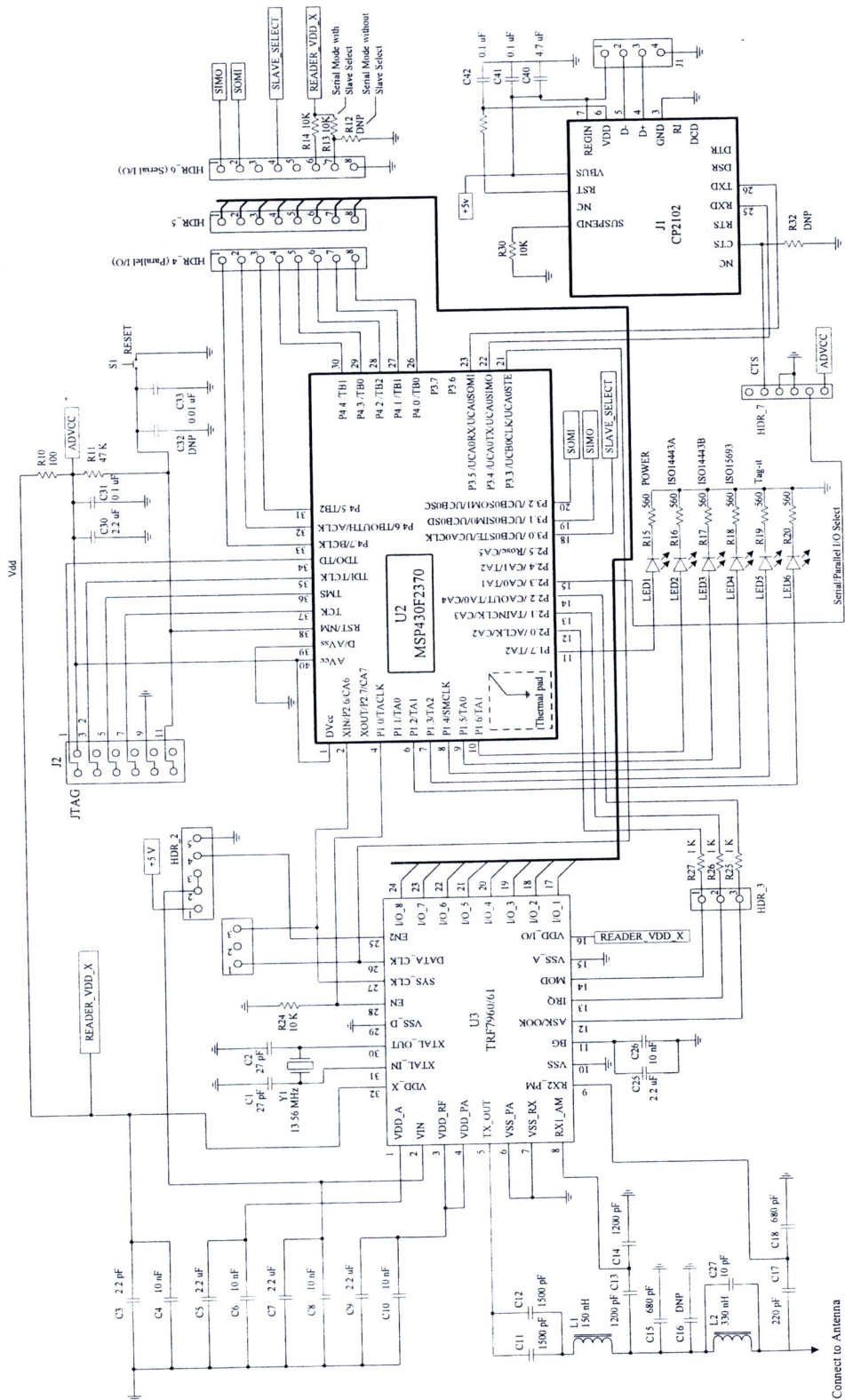
1. มีโปรโตคอลสำหรับการติดต่อสื่อสารกับแท็ก RFID รวมอยู่ใน
2. มีการแยกแหล่งจ่ายกำลังงานระหว่างส่วนที่เป็นอนาล็อก ดิจิตอล และภาคขยายเพื่อประโยชน์ในการลดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้น
3. มีภาครับสัญญาณสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นภาครับสัญญาณ AM และ PM ตามลำดับ
4. มีตัวบอกระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ทั้งภาครับสัญญาณ AM และ PM
5. มีกระบวนการ Anti-Collision ในระหว่างการอ่านแท็ก RFID หลายๆ ตัวพร้อมกัน
6. มีรีจิสเตอร์ที่สามารถใช้ได้จำนวน 11 ตัว
7. สามารถที่จะกำหนดอัตราขยายของภาครับได้
8. สามารถเลือกกำลังงานส่งได้ระหว่าง 100 mW และ 200 mW
9. มีการมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK
10. ต้องการแหล่งจ่ายไฟ DC ที่อยู่ในช่วง 2.7 ถึง 5.5 Vdc

11. สามารถติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยพอร์ตแบบขนาน 8 บิต หรือพอร์ตแบบอนุกรม 4 พิน
12. สามารถติดต่อสื่อสารกับแท็ก RFID ในย่าน HF ด้วยโปรโตคอล ISO14443A ISO14443B ISO15693 ISO18000-3 และ Tag-it
13. มีลักษณะของชิพ IC แบบ 32 พิน แบบ QFN (5 mm × 5 mm)



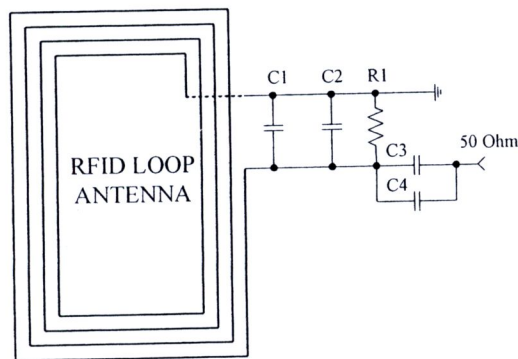
รูปที่ 3.1 ลักษณะของชิพ IC เบอร์ TRF7690/91

จากนั้นจึงได้นำชิพ IC เบอร์ TRF7690/91 มาประกอบเป็นเครื่องอ่าน RFID ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ สายอากาศ RFID Front End ไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.2 วงจรแบบสคีมเมติก (Schematic Diagram) ของเครื่องอ่านข้อมูล RFID

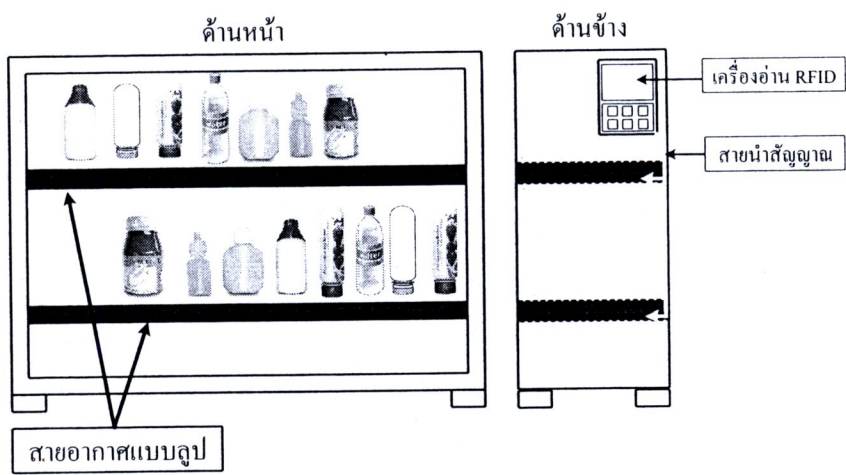
วงจรในรูปที่ 3.2 นั้นประกอบไปด้วย 3 ส่วน ทำงานร่วมกันเป็นเครื่องอ่านข้อมูล RFID ส่วนแรกคือ IC เบอร์ TRF7690/91 ทำหน้าที่เป็น RFID Front End ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งและรับสัญญาณเพื่อติดต่อสื่อสารกับแท็ก RFID ด้วยคลื่นวิทยุความถี่ 13.56 MHz ส่วนที่ 2 คือ IC เบอร์ MSP430 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ในการโปรแกรมและสั่งงาน IC เบอร์ TRF7690/91 ให้ทำหน้าที่ในการติดต่อสื่อสารกับแท็ก RFID ตามต้องการ อีกทั้งยังทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลที่อ่านได้จากแท็ก RFID เพื่อที่จะส่งไปยังคอมพิวเตอร์อีกด้วย ส่วนที่ 3 คือ IC เบอร์ CP2102 ซึ่งจะทำหน้าที่ในการรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ รูปที่ 3.3 แสดงวงจรของสายอากาศแบบลูปที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่องอ่าน RFID



รูปที่ 3.3 วงจรส่วนสายอากาศแบบลูป

การติดตั้งระบบ RFID เข้ากับตู้เก็บของ

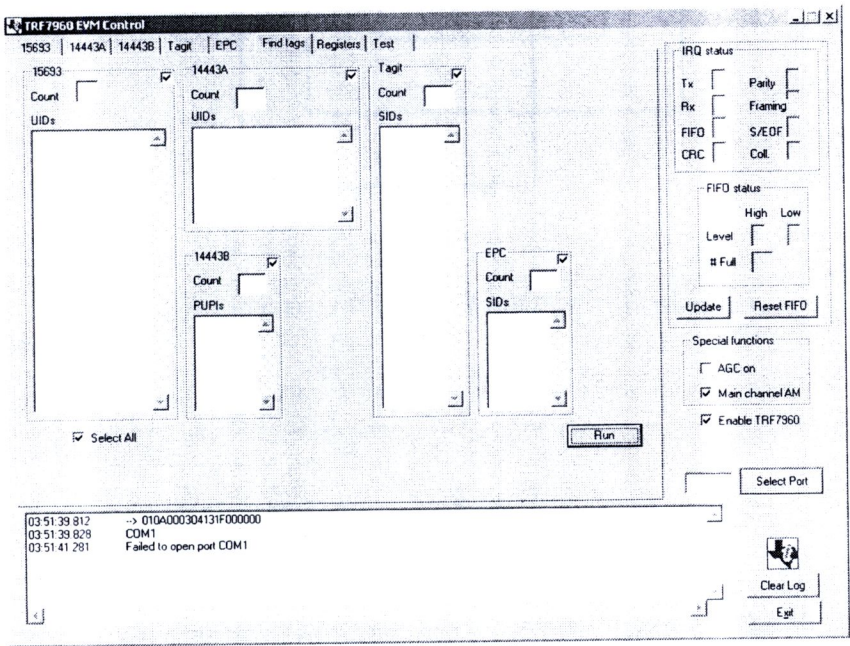
เมื่อได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอ่าน RFID ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้เสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงนำเครื่องอ่าน RFID และสายอากาศไปติดตั้งกับตู้หรือชั้นวางสิ่งของตามความเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 3.4 และในส่วนของแท็ก RFID นั้นจะถูกติดตั้งกับสิ่งของที่อยู่ภายในตู้เก็บของ



รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งระบบ RFID เข้ากับตู้เก็บของ

การออกแบบส่วนแสดงผล

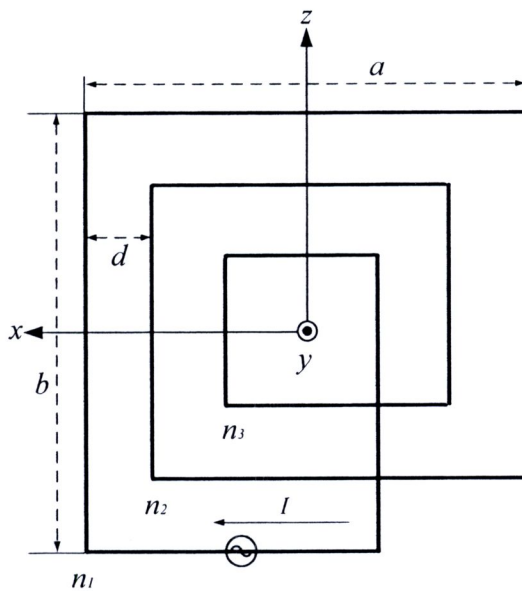
ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการออกแบบส่วนการแสดงผล ซึ่งในเบื้องต้นนี้จะทำการออกแบบส่วนการแสดงผลบนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ก่อนจากนั้นจึงจะทำการพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบที่ใช้งานง่ายขึ้นในลำดับต่อไป รูปที่ 3.5 แสดงส่วนการแสดงผลของระบบตู้เก็บของอัจฉริยะ



รูปที่ 3.5 ส่วนการแสดงผลของระบบตู้เก็บของอัจฉริยะ

3.3 การออกแบบโครงสร้างสายอากาศ

โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่เกิดจากการจัดวางของเส้นลวดตัวนำเดียวกันให้มีลักษณะเป็นบ่วงเกลียวซ้อนกัน ซึ่งมีขนาดเท่ากับ $a \times b$ หรือ 30×30 cm ขนาดของบ่วงจะวางซ้อนกันจากใหญ่ไปหาเล็ก โดยมีตัวแปรสำคัญคือระยะห่างระหว่างบ่วง โดยกำหนดให้เป็น d แต่ยังคงจำนวนบ่วงไว้เท่าเดิมคือ 3 บ่วง โดยกำหนดให้เป็น n ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จำแนกสายอากาศเพื่อทำการวิเคราะห์ตามค่า d ที่มีค่าต่าง ๆ กันดังนี้คือ 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 cm ซึ่ง d แต่ละค่าก็คือสายอากาศแต่ละแบบที่นำมาวิเคราะห์นั่นเอง โครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

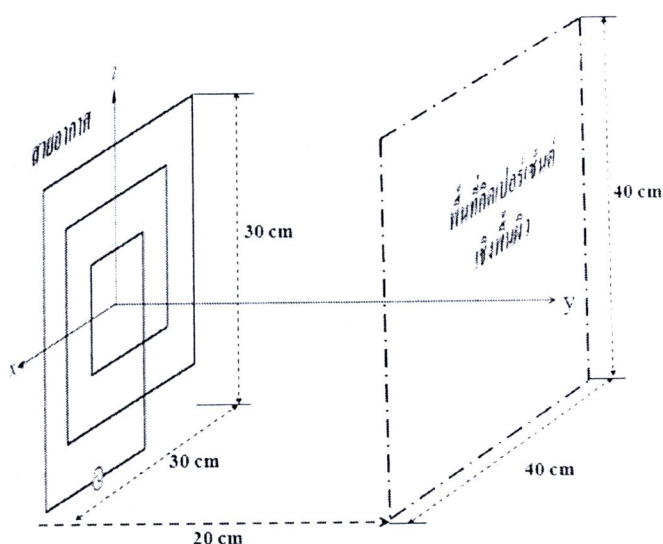


รูปที่ 3.6 โครงสร้างสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียว

3.4 การจำลองสายอากาศ

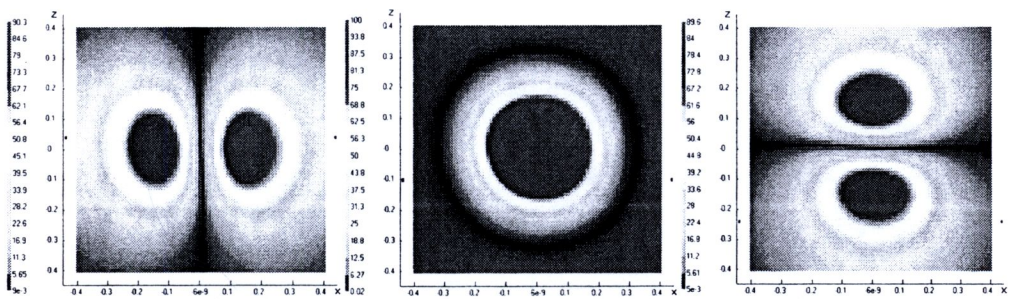
จากโครงสร้างของสายอากาศที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.3 ดังนั้นในหัวข้อนี้จะมีสายอากาศที่นำมาวิเคราะห์และจำลองผลทั้งหมด 12 แบบด้วยกัน โดยแบ่งออกเป็นสายอากาศบ่วงธรรมดาที่ไม่มีเกลียว ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบบ่วง 1 แบบ สายอากาศบ่วงแบบขดเกลียวที่ขดให้เกลียวทับกันจำนวน 3 ขด 1 แบบ และสายอากาศบ่วงแบบขดเกลียวที่มีระยะห่างระหว่างบ่วง d ตั้งแต่ 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 cm ทั้งหมด 10 แบบ รวมกันเป็น 12 แบบ จุดประสงค์ในการวิเคราะห์เพื่อดู

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างบ่วงกับจำนวนบ่วงของสายอากาศที่จะมีผลต่อแบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็ก การวิเคราะห์แบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC โดยแทนค่าขนาด a และ $b = 30$ cm ซึ่งเป็นขนาดที่จะนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทดสอบ กระแสแหล่งกำเนิดที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 1 A ทำการพล็อตสนามแม่เหล็กในระนาบ xz โดยค่าแกน x เริ่มจาก -20 ถึง 20 cm และค่าแกน z เริ่มจาก -20 ถึง 20 cm ที่ระยะ y เท่ากับ 20 cm ทำการพล็อตค่าสนามแม่เหล็กทั้ง 3 องค์ประกอบ คือ $H(x)$, $H(y)$ และ $H(z)$ โดยแสดงโครงสร้างแบบจำลองแบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



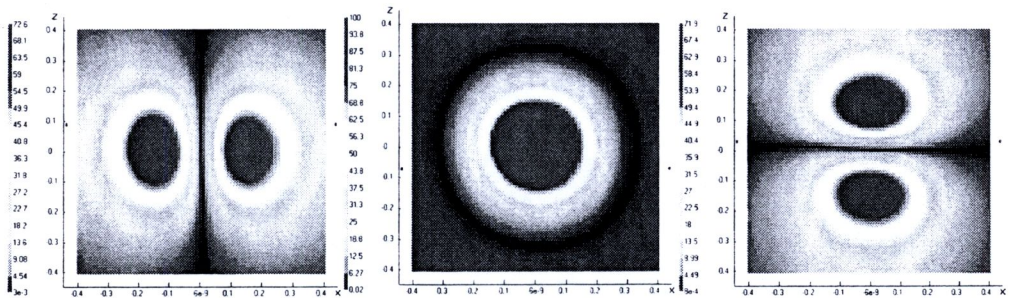
รูปที่ 3.7 โครงสร้างการจำลองแบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็ก

ผลการจำลองแบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กของสายอากาศซึ่งในส่วนนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการจำลองมาแสดงผลในรูปของสนามแม่เหล็กที่กระจายออกทั้งสามแนวแกนหลักในแนวตั้งฉากจากระนาบ xz ของสายอากาศคือ $H(x)$, $H(y)$ และ $H(z)$ โดยผลการจำลองดังกล่าวจะถูกนำค่าออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์เชิงเส้น และจะถูกนำไปคำนวณให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่เพื่อให้วิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแต่ละแบบได้แม่นยำ ถูกต้องและเหมาะสมซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 3.5 รูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.8 ถึงรูปที่ 3.19



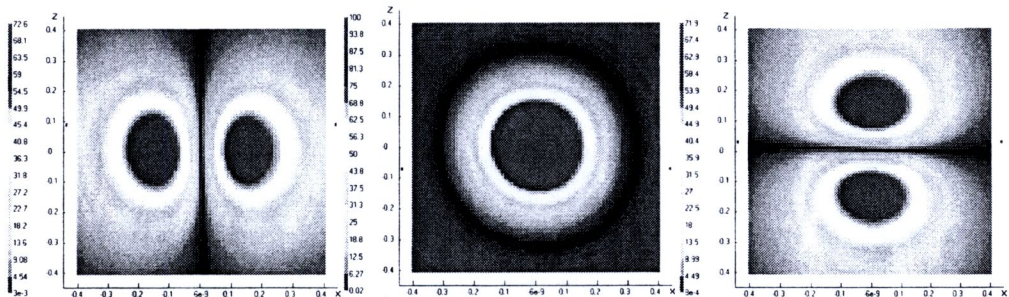
(ก) $H(x)$ (ข) $H(y)$ (ค) $H(z)$

รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบวงสี่เหลี่ยม



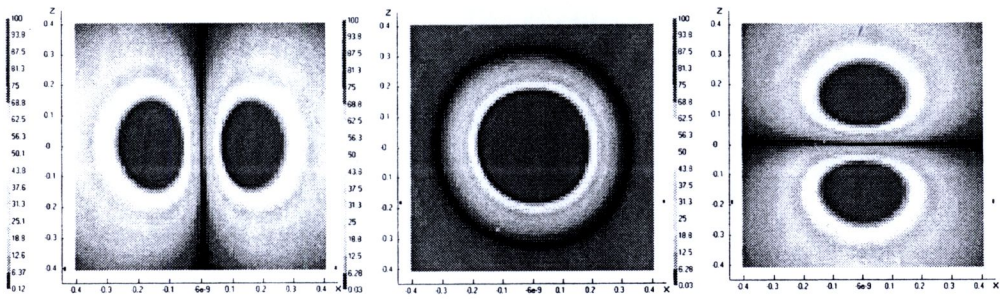
(ข) $H(x)$ (ข) $H(y)$ (ค) $H(z)$

รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่
ขดให้เกลียวทับกันจำนวน 3 ขด

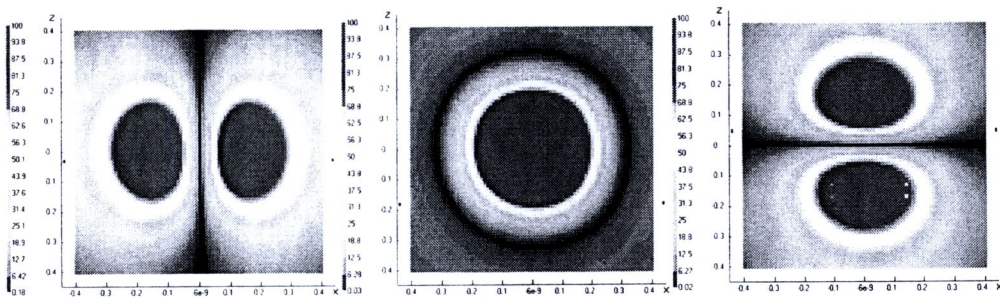


(ค) $H(x)$ (ข) $H(y)$ (ค) $H(z)$

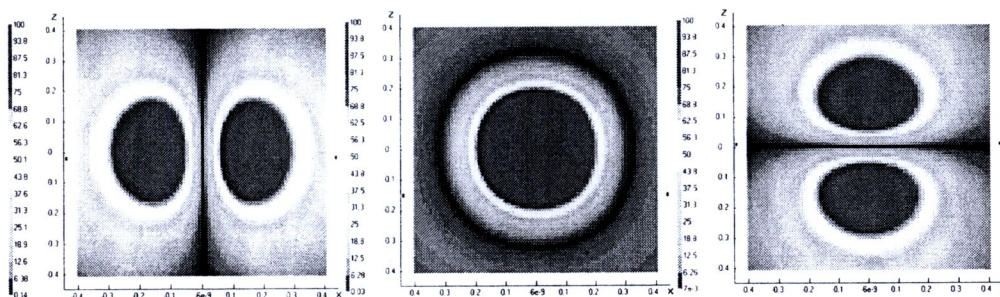
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่
มี d เท่ากับ 0.5 cm

(ก) $H(x)$ (ข) $H(y)$ (ค) $H(z)$

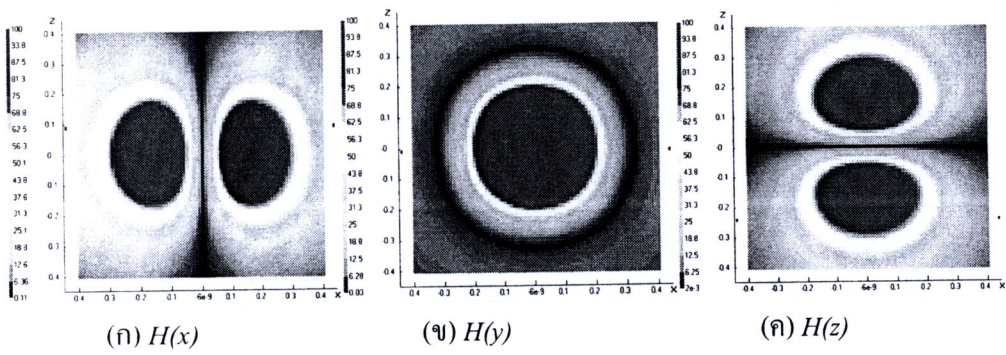
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 1 cm

(ก) $H(x)$ (ข) $H(y)$ (ค) $H(z)$

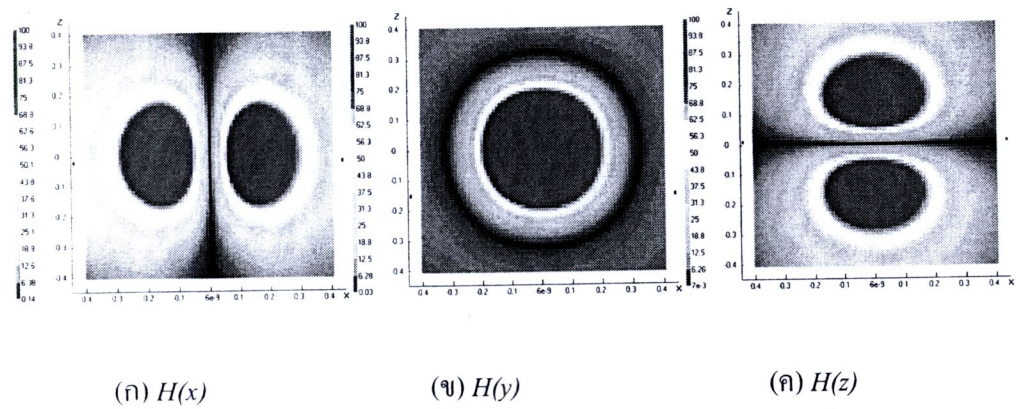
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 1.5 cm

(ก) $H(x)$ (ข) $H(y)$ (ค) $H(z)$

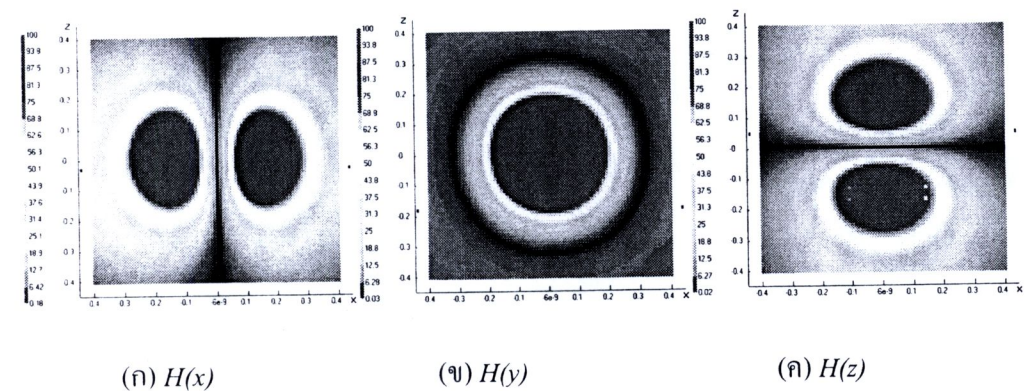
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 2 cm



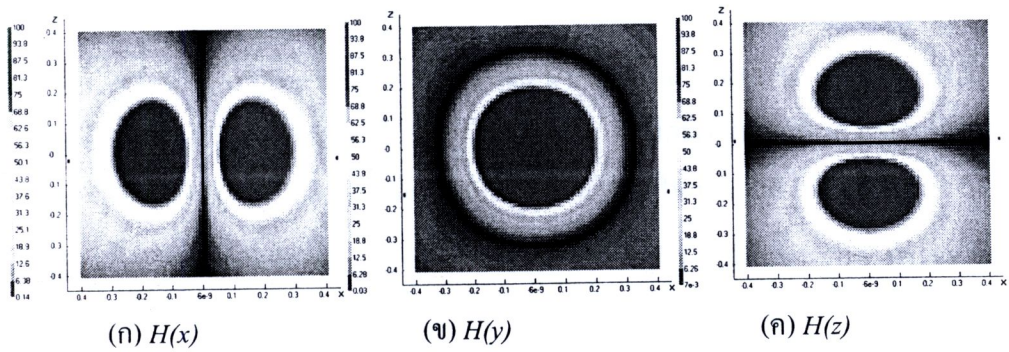
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 2.5 cm



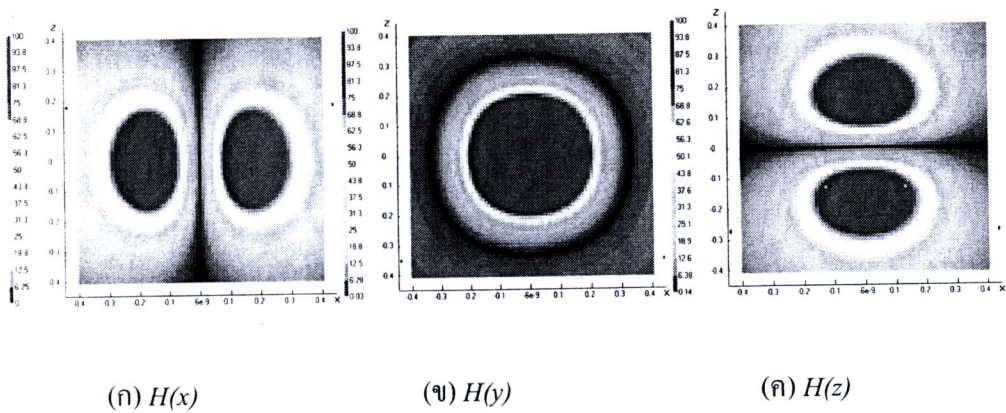
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 3 cm



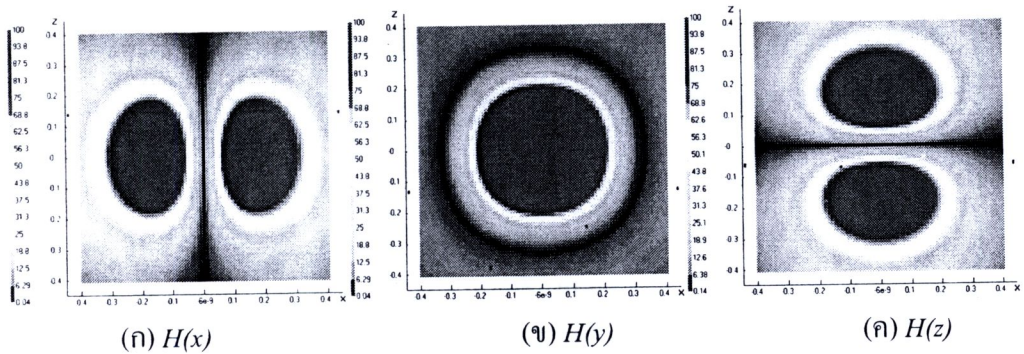
รูปที่ 3.406 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 3.5 cm



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 4 cm



รูปที่ 3.18 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 4.5 cm



รูปที่ 3.19 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 5 cm



3.5 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ

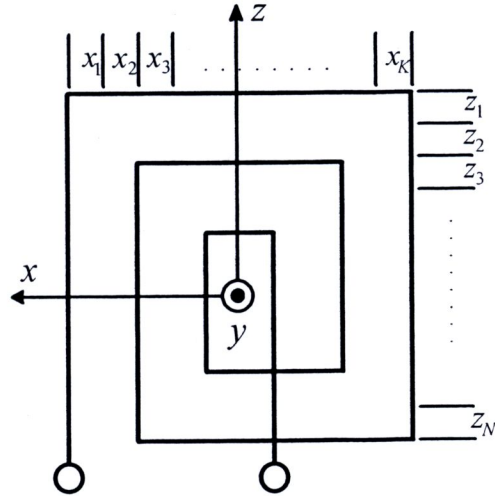
การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศนั้น เริ่มจากการพิจารณาแบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กก่อน จากนั้นจึงนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงเส้น ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวและค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศ ซึ่งนิยามของค่าเปอร์เซ็นต์เหล่านี้จะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

การพิจารณาหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงเส้น เปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิว จะใช้แบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กขององค์ประกอบในแต่ละทิศทางในระนาบ xz มาพิจารณาพื้นผิวที่ใช้จะมีขนาดของพื้นที่เท่ากับ 40×40 cm โดยการแบ่งระยะตามแนว z ออกเป็นเส้นย่อยๆ เป็นจำนวน N ส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งในแต่ละเส้นของ z_n นั้นจะแบ่งย่อยระยะตามแนว x ออกเป็นส่วนๆ เป็นจำนวน K ส่วนเพื่อให้ผลลัพธ์เกิดการลู่เข้า (Converge) จะให้แต่ละจุดห่างกัน 1 cm (โดยจุดที่วิเคราะห์นั้นจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของส่วนย่อย) และจากนั้นพิจารณาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแต่ละส่วน $H(x_k)$ เปรียบเทียบกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกระตุ้น H_i โดยที่ค่าความแรงนี้สามารถหาได้จากการทดสอบร่วมกับการจำลอง โดยวัดระยะการอ่านที่ไกลที่สุดจากแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูลแล้วนำระยะอ่านที่ไกลที่สุดนี้ไปจำลองแบบเพื่อหาค่า H_i ซึ่งจะเท่ากับ 56 mA/m (สำหรับแท็กชนิด ISO Card) ในกรณีที่สมมุติการป้อนแหล่งจ่ายกระแสของสายอากาศเครื่องอ่านเท่ากับ 1 A สาเหตุที่ต้องใช้การสมมุติกระแสที่แหล่งจ่ายเพราะไม่สามารถวัดกระแสที่ป้อนให้แก่สายอากาศได้โดยตรง เนื่องจากเครื่องมือวัดมีผลกระทบต่อระยะการอ่านของเครื่องอ่านเป็นอย่างมาก ดังนั้นผลที่ได้จะมีความผิดพลาดมาก การหาค่า H_i โดยใช้วิธีนี้มีความน่าเชื่อถือได้เพราะได้ทดสอบกับสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีลักษณะหลายแบบหลายรูปทรง พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกันดี

การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงเส้นนั้นจะพิจารณาจากการนำสายอากาศไปใช้ในทางปฏิบัติคือ แท็กจะถูกวางอยู่กับที่ในแนวเส้นตรงกับสายอากาศ ดังนั้นถ้าจุดใดจุดหนึ่งในแนวเส้นตรง (แนวแกน x) ที่ระยะ z_n ที่พิจารณาอยู่จากด้านหน้าของสายอากาศ ณ จุดใดจุดหนึ่ง มีค่า $|H(x_k)| \geq H_i$ จะถือว่าเส้นตรงเส้นนั้นมีค่า $P_l(z_n)$ เท่ากับ 100% ในทางกลับกันถ้าทุกจุดบนเส้นตรงจากด้านหน้าของสายอากาศมีค่า $|H(x_k)| < H_i$ เส้นตรงนั้นจะมีค่า $P_l(z_n)$ เท่ากับ 0% เสร็จแล้วนำค่า $P_l(z_n)$ นั้นมาใช้คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวดังสมการต่อไปนี้

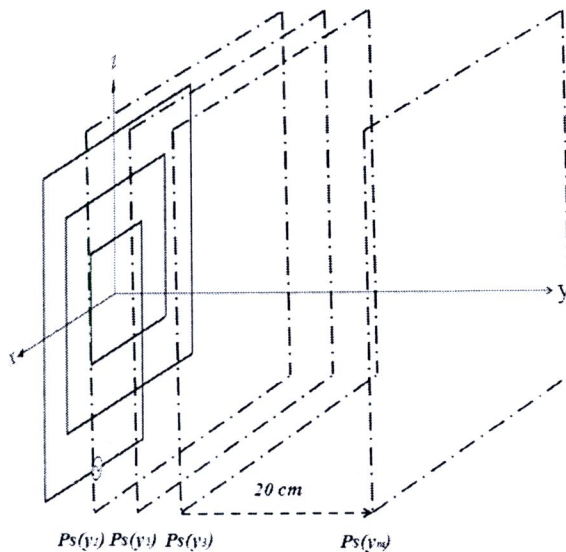
$$P_s(y_m) = \frac{\sum_{n=1}^N P_l(z_n)}{N} ; P_s(y_m) \leq 100\% \quad (3.1)$$

ซึ่ง N คือ จำนวนเส้นทั้งหมดที่แบ่งตามแนวแกน z เพื่อให้ผลลัพธ์เพียงพอสำหรับการลู่เข้า จะกำหนดให้แต่ละจุดห่างกัน 1 cm (โดยจุดที่วิเคราะห์นั้นจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของส่วนย่อย) $P_s(y_m)$ คือ เปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ตำแหน่ง y_m ใดๆ n เท่ากับ $1, 2, 3, \dots, N$ และ m เท่ากับ $1, 2, 3, \dots, M$



รูปที่ 3.41 การแบ่งระยะตามแนว x และ z ออกเป็นส่วนย่อย

จากการพิจารณาในกรณีของแต่ละพื้นผิวจาก $y = 2$ ถึง 20 cm จึงสามารถคิดในกรณีทั้งปริมาตรระหว่างสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรแสดงได้ดังสมการที่ (3.2)



รูปที่ 3.21 การพิจารณาหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร

$$P_v = \frac{\sum_{m=1}^M P_s(y_m)}{M} ; P_v \leq 100\% \tag{3.2}$$

ซึ่ง M คือ จำนวนของพื้นผิวทั้งหมดที่แบ่งตามแนวแกน y เพื่อให้ผลลัพธ์เกิดการลู่เข้าจะกำหนดให้แต่ละพื้นผิวห่างกัน 2 cm P_v คือ ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรที่แสดงถึงความสามารถในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก และ m เท่ากับ 1, 2, 3,..., M เนื่องจากค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรนั้นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าความสามารถในการติดต่อสื่อสารของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ฉะนั้นเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรมีค่าสูงก็จะหมายความว่า ณ บริเวณที่พิจารณา มีเนื้อที่ส่วนมากที่เครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กสามารถติดต่อสื่อสารกันสำเร็จ แต่ถ้าค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรมีค่าต่ำก็จะหมายความว่า ณ บริเวณที่พิจารณานั้น มีเนื้อที่ส่วนน้อยที่เครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กสามารถติดต่อสื่อสารกันสำเร็จ

3.6 ผลการจำลองค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวของสายอากาศ

การพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิว จะใช้แบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็กขององค์ประกอบในแต่ละทิศทางในระนาบ xz มาพิจารณา ซึ่งพื้นผิวที่ใช้จะมีขนาดของพื้นที่เท่ากับ 40 x 40 cm ที่มีระยะห่างจากสายอากาศในแนวแกน y เท่ากับ 20 cm ผลที่ได้จากการคำนวณดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวของสายอากาศในแต่ละแบบ

รูปแบบ	P_{s,H_x} (%)	P_{s,H_y} (%)	P_{s,H_z} (%)
แบบสี่เหลี่ยม	89.7	100	89.7
แบบมีเกลียวทับกัน 3 ชด	91.4	100	90.2
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 0.5 cm	93.6	100	93.5
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 1 cm	94.1	100	94.4
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 1.5 cm	95.7	100	95.8
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 2 cm	96.1	100	96.2
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 2.5 cm	96.4	100	96.4
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 3 cm	96.7	100	96.7
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 3.5 cm	96.9	100	97.0
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 4 cm	97.3	100	97.3
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 4.5 cm	97.5	100	97.5
แบบมีเกลียวที่ d เท่ากับ 5 cm	100	100	97.5

ผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศแต่ละแบบดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในกรณีที่ค่า H_x เท่ากับ 56 mA/m (สำหรับแท็กชนิด ISO Card) ทำให้สรุปได้ว่าสายอากาศแบบบ่วงที่มีเกลียวสามารถเพิ่มการกระจายความเข้มของสนามแม่เหล็กได้จริงทั้งสามแนวแกนหลัก คือ $H(x)$, $H(y)$ และ $H(z)$ จากผลที่ได้พบว่าสายอากาศที่มี d เท่ากับ 5 cm ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสูงสุดทั้งสามแนวแกนหลัก คือ P_{s,H_x} เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ P_{s,H_y} เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และ P_{s,H_z} เท่ากับ 97.5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงนำสายอากาศที่มี d เท่ากับ 5 cm ไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรซึ่งค่าที่ได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.3 ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศที่มี d เท่ากับ 5 cm ที่แนวแกน $y = 2$ ถึง 20 cm

ระยะ	P_{s,H_x} (%)	P_{s,H_y} (%)	P_{s,H_z} (%)
$y=2$ cm	100	100	97.5
$y=4$ cm	100	100	97.5
$y=6$ cm	100	100	97.5
$y=8$ cm	100	100	97.5
$y=10$ cm	100	100	97.5
$y=12$ cm	100	100	97.5
$y=14$ cm	100	100	97.5
$y=16$ cm	100	100	97.5
$y=18$ cm	100	100	97.5
$y=20$ cm	100	100	97.5

นำค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวที่ได้จากตารางที่ 3.2 มาหาผลรวมตั้งแต่ y เท่ากับ 2 cm จนถึง y เท่ากับ 20 cm ทั้งสามแนวแกนหลักก็จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศ ซึ่งมีค่าดังนี้คือ P_{v,H_x} เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ P_{v,H_y} เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และ P_{v,H_z} เท่ากับ 97.5 เปอร์เซ็นต์

3.7 บทสรุป

การออกแบบเครื่องอ่านข้อมูลและการจำลองแบบสายอากาศแบบบ่วงเกลียวที่นำเสนอในบทนี้ มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาสายอากาศให้มีความสามารถในการติดต่อสื่อสารในทุกแนวแกนให้ใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ ด้วยการเพิ่มจำนวนบ่วงของสายอากาศ โดยสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์จะถูกกำหนดให้มี

ระยะห่างระหว่างบ่วง d เท่ากับ 0.5 cm จนถึง 5 cm จากผลที่ได้พบว่าสายอากาศที่มีระยะห่างระหว่างบ่วง d เท่ากับ 5 cm มีค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ทั้งสามแนวแกนหลักที่ตั้งฉากกันมีค่าเหมาะสมที่สุดอยู่ที่ P_{s,H_x} เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ P_{s,H_y} เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และ P_{s,H_z} เท่ากับ 97.5 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรที่ y เท่ากับ 2 cm ไปจนถึง y เท่ากับ 20 cm โดยแต่ละพื้นผิวห่างกัน 2 cm ซึ่งมีค่าดังนี้คือ P_{v,H_x} เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ P_{v,H_y} เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และ P_{v,H_z} เท่ากับ 97.5 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้จากการจำลองทำให้สรุปได้ว่าสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวสามารถเพิ่มความแรงของสนามแม่เหล็กที่กระจายออกจากสายอากาศได้