

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์และหลักการพัฒนาเครื่องมือ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

แมกเนติกเรโซแนนซ์ เป็นปรากฏการณ์ที่พบในระบบแม่เหล็กที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก $\vec{\mu}$ และโมเมนต์เชิงมุม $\hbar I$ เช่น นิวเคลียสของอะตอม โดยเกิดขึ้นเมื่อความถี่ที่มากระตุ้นตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบแม่เหล็ก ในกรณีของนิวเคลียสหมายถึงความถี่ในการส่าย (Precession) ของโมเมนต์แม่เหล็กในสนามแม่เหล็กสถิต (Static magnetic field) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ โดยในการทดลองใช้สนามแม่เหล็กสลับย่านความถี่สูง (RF field) กระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์นี้ และขณะเกิดเรโซแนนซ์นิวเคลียสจะดูดกลืนพลังงานจากสนามแม่เหล็กสลับ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น สัญญาณที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานคือสัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์นั่นเอง สัญญาณนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ที่เกิดจากนิวเคลียสของโปรตอนจึงเป็นโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ โปรตอนมีโมเมนต์เชิงมุม J และมีโมเมนต์แม่เหล็ก $\vec{\mu}$ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{J} \quad (2.1)$$

เมื่อ γ เป็นอัตราส่วนแมกเนโตไจริค (magnetogyric ratio) (Charles Kittel, 1991) ขนาดของโมเมนต์แม่เหล็ก μ คือ

$$\mu = \gamma \hbar \sqrt{I(I+1)} \quad (2.2a)$$

เมื่อ I คือ spin quantum number

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{และ } h \text{ คือค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck constant)}$$

และโปรตอนเอ็นเอ็มอาร์

$$\gamma = 2.675 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ tesla}^{-1} \quad (2.2b)$$

ในสนามแม่เหล็ก \vec{B}_0 โมเมนต์แม่เหล็กจะมีพลังงานศักย์

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0 \quad (2.3)$$

ถ้า $\vec{B}_0 = B_0 \hat{z}$ จะได้ว่า

$$U = -\mu_z B_0 = -\gamma \hbar B_0 I_z \quad (2.4)$$

เมื่อ I_z คือ $m_I = I, I-1, I-2, \dots, -I$

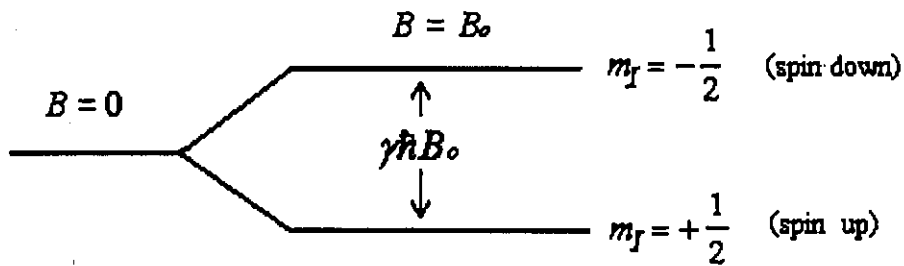
ดังนั้น

$$U = -m_I \gamma \hbar B_0 \quad (2.5)$$

สำหรับโปรตอน $I = \pm \frac{1}{2}$ และ $m_I = \pm \frac{1}{2}$ เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กโปรตอนจะมีสองระดับพลังงานโดยมีความแตกต่างของพลังงาน

$$\Delta U = \gamma \hbar B_0 \quad (2.6)$$

แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการแยกของระดับพลังงานของโปรตอนในสนามแม่เหล็กสถิตขนาด B_0

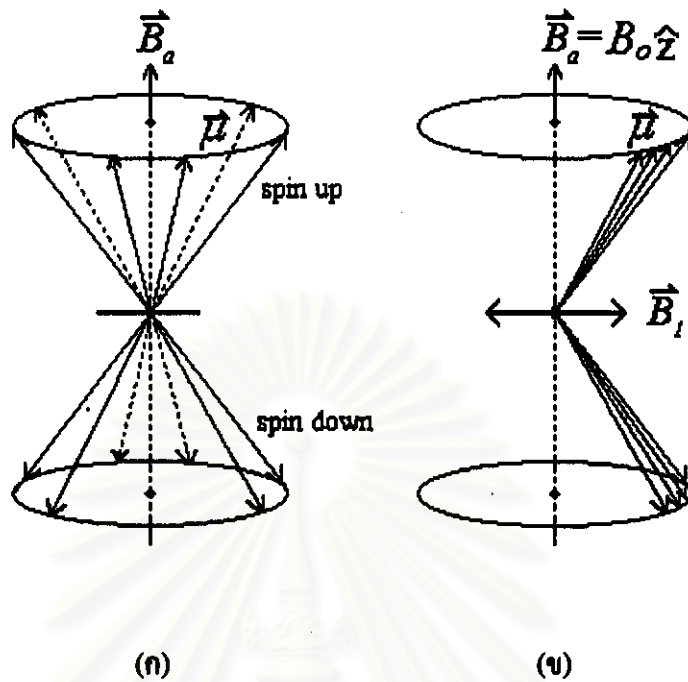
สมการที่ 2.6 อาจเขียนได้เป็น

$$\Delta U = \hbar \omega_0 \quad (2.7)$$

โดย

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (2.8)$$

อาจแสดงได้ว่าในสนามแม่เหล็กสถิต $\vec{B}_a = B_0 \hat{z}$ นี้โมเมนต์แม่เหล็ก $\vec{\mu}$ จะทำรอบสนามแม่เหล็กสถิต \vec{B}_a ด้วยความถี่เชิงมุม ω_0 สำหรับ $m_J = +1/2$ $\vec{\mu}$ จะชี้ไปในทางเดียวกันกับ \vec{B}_a เรียกว่าโปรตอนมีสปินขึ้น (spin up) ซึ่งจะมีระดับพลังงานต่ำกว่า แต่สำหรับในโปรตอนที่มี $m_J = -1/2$ $\vec{\mu}$ จะชี้สวนทางกับ \vec{B}_a เรียกว่าโปรตอนมีสปินลง (spin down) ระดับพลังงานจะสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ก) และถ้าให้สนามแม่เหล็กสถิต \vec{B}_1 ที่มีความถี่เชิงมุม ω_0 ในระนาบ xy ซึ่งตั้งฉากกับแนวสนามแม่เหล็กสถิต \vec{B}_a ดังรูปที่ 2.2 (ข) อาจแสดงได้ว่าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงาน (Transition) ระหว่างระดับพลังงานทั้งสองในรูปที่ 2.1 โดยโมเมนต์แม่เหล็กจะพลิกกลับไปกลับมา (spin flip) กล่าวคือเกิดการดูดกลืนและถ่ายเทพลังงาน ดังนั้นความถี่เชิงมุม ω_0 ของ B_1 จากสมการที่ 2.8 ก็คือเงื่อนไขของการดูดกลืนพลังงานของแมกเนติกเรโซแนนซ์ (magnetic resonance absorption) นั่นเอง



รูปที่ 2.2 (ก) แสดงการวางตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก $\vec{\mu}$ ในสนามแม่เหล็กสถิต \vec{B}_0

(ข) แสดงสนามแม่เหล็กสลับ \vec{B}_1 ในแนวตั้งฉากกับ \vec{B}_0 ซึ่งทำให้โปรตอนเปลี่ยนทิศของสปินและเปลี่ยนระดับพลังงาน

ถ้าให้ f เป็นความถี่ตั้งห้อง (resonance frequency) ของสนามแม่เหล็กสลับ \vec{B}_1 จะ

ได้ว่า

$$\omega_0 = 2\pi f \quad (2.9)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.6 เจริญใจของการดูดกลืนพลังงานของแมกเนติกเรโซแนนซ์จะได้ว่า

$$2\pi f = \gamma B_0 \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.2b จะได้ว่า

$$f(\text{MHz}) = 42.58 B_0(\text{tesla}) \quad (2.11a)$$

$$B_0(\text{tesla}) = 23.49f(\text{KHz}) \quad (2.11b)$$

และสมการที่ 2.11 เป็นเงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ของโปรตอนเอ็นเอ็มอาร์ซึ่งใช้เป็นหลักในการพัฒนาเครื่องเพื่อวัดปริมาณน้ำมันในงานวิจัยนี้

2.2 สถิติของโบลต์ซมานน์ (Boltzmann Statistics)

เนื่องจากโปรตอนมีโมเมนต์แม่เหล็ก ในสนามแม่เหล็กสถิต $B_0 \hat{z}$ โปรตอนจะส่ายรอบสนามแม่เหล็กนี้ การวางตัวของโปรตอนในสนามแม่เหล็กสถิตนี้เป็นได้สองแบบซึ่งมีระดับพลังงานต่ำและสูง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 พิจารณาในแง่ของพลังงาน โปรตอนน่าจะวางตัวอยู่ในระดับพลังงานต่ำกว่าคือมีสปินขึ้นทั้งหมด แต่จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์สถิติ เนื่องจากการกระตุ้นของพลังงานความร้อน (Thermal excitation) โปรตอนจำนวนหนึ่งจะถูกกระตุ้นให้มีสปินลง กล่าวคือมีพลังงานสูงขึ้นได้ จากทฤษฎีของโบลต์ซมานน์พบว่า

ถ้า N^+ เป็นจำนวนโปรตอนซึ่งมีสปินขึ้น และมีระดับพลังงาน U^+

N^- เป็นจำนวนโปรตอนซึ่งมีสปินลง และมีระดับพลังงาน U^-

โดย $U^- > U^+$ อัตราส่วน N^+/N^- จะเขียนได้เป็น

$$\frac{N^+}{N^-} = e^{(U^- - U^+)/k_B T} = e^{\Delta U / k_B T} \quad (2.12)$$

โดย $\Delta U = U^- - U^+ = \gamma \hbar B_0$

k_B = ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ 1.3805×10^{-23} J/K

T = อุณหภูมิเคลวิน (K)

จากสมการที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าสำหรับสนามแม่เหล็กสถิต B_0 คงที่ค่าหนึ่ง ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ $e^{\Delta U/k_B T}$ จะมีค่าสูง หมายความว่า $N^+ \gg N^-$ นั่นคือโปรตอนมีสปินขึ้นอยู่ในระดับพลังงานต่ำเกือบทั้งหมด แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำขึ้นมากๆ เทอม $\Delta U/k_B T$ จะลดลงทำให้อัตราส่วน N^+/N^- เข้าใกล้ 1 นั่นคือ โปรตอนจะอยู่ในระดับพลังงานต่ำและสูงเกือบเท่ากัน แต่ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำ คงที่ ถ้าใช้ สนามแม่เหล็กสถิต B_0 ความเข้มสูงๆ N^+ จะมากกว่า N^- มาก ($N^+ \gg N^-$) ขณะที่ B_0 ความเข้มต่ำจะทำให้ N^+ และ N^- เกือบเท่ากัน

ในการทดลองเอ็นเอ็มอาร์ ถ้า $N^+ \geq N^-$ สนามแม่เหล็กสถิต B_1 จะทำให้การเปลี่ยนสถานะของสปิน ขึ้น-ลง ของโปรตอนต่างๆ กัน นั่นคือเกือบจะไม่มีการดูดกลืนพลังงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ สัญญาณเอ็นเอ็มอาร์จะไม่ชัดเจน เพื่อที่จะทำให้สัญญาณเอ็นเอ็มอาร์นี้ชัดเจน จะต้องทำให้ $N^+ \gg N^-$ ในกรณีนี้โปรตอนส่วนใหญ่จะมีสปินขึ้นซึ่งมีพลังงานน้อย จะถูกกระตุ้นให้กลายเป็นแบบสปินลง ซึ่งมีพลังงานมาก กล่าวคือโปรตอนส่วนใหญ่จะดูดกลืนพลังงานจากสนามแม่เหล็กสถิต B_1 ดังนั้นสัญญาณการดูดกลืนพลังงานหรือสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์จะสูงและเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากการทดลองทำที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิ T ถือได้ว่าคงที่ ดังนั้นเพื่อให้เกิดสภาวะ $N^+ \gg N^-$ มีวิธีเดียวที่จะต้องใช้นสนามแม่เหล็ก B_0 ความเข้มสูงเท่าที่เครื่องมือจะอำนวย ซึ่งจะทำการทดลองเอ็นเอ็มอาร์ให้สัญญาณที่ชัดเจนตามต้องการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 Relaxation

โปรตอนมีสปิน $\frac{1}{2}$ เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กจำนวนนิวเคลียสในแต่ละระดับพลังงานจะไม่เท่ากันการเปลี่ยนแปลงจำนวนนิวเคลียสในแต่ละระดับพลังงานเพื่อไปสู่ภาวะสมดุลอันใหม่จะเป็นกระบวนการแบบเอ็กโปเนนเชียล กระบวนการนี้เรียกว่า การผ่อนคลายสปิน-แลตทิซ (spin-lattice relaxation) ซึ่งคำว่าแลตทิซ (Lattice) หมายถึงโครงสร้างทั้งหมด หรือนิวเคลียสข้างเคียงที่มาล้อมรอบ หรืออาจเรียกว่าสิ่งแวดล้อม

สำหรับการส่งผ่านพลังงานไปยังนิวเคลียสข้างเคียงที่มีค่าความแตกต่างของระดับพลังงานเท่ากัน ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนพลังงาน เรียกว่า การผ่อนคลายสปิน-สปิน (spin-spin relaxation) กระบวนการนี้ไม่ทำให้พลังงานของระบบเปลี่ยนแปลง

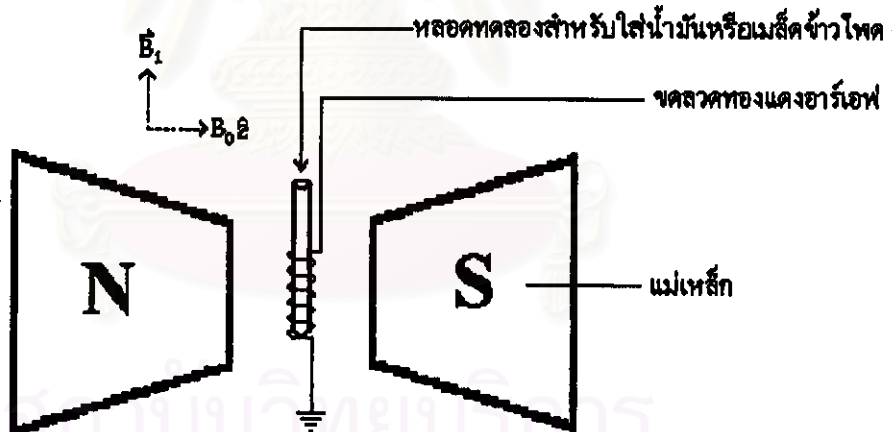
ค่าเฉลี่ย half-life ของกระบวนการ spin-lattice relaxation เรียกว่า T_1 และของ spin-spin relaxation เรียกว่า T_2 ซึ่ง T_2 นี้เกิดจากความไม่สมดุลของโมเมนต์แม่เหล็กในแนวแกน x และแนวแกน y ซึ่งเป็นแนวที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ถ้า T_1 และ T_2 มีค่าน้อย ช่วงชีวิตของนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นก็จะสั้น ทำให้เกิดสัญญาณการดูดกลืนพลังงานหรือสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ที่มีไลน์วีดน์กว้าง ถ้า T_1 และ T_2 มีค่ามาก เช่นอยู่ในช่วงของ 1 วินาที สัญญาณการดูดกลืนพลังงานก็จะคมชัด

สำหรับของเหลวที่ไม่หนืด รวมทั้งสารละลายที่ไม่หนืดการจัดตัวของโมเลกุลค่อนข้างอิสระทำให้การส่งผ่านพลังงานด้วยกระบวนการ spin-lattice relaxation ไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้ T_1 มีค่ามาก ซึ่งในของเหลวจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10^3 ถึง 10^2 วินาที ดังนั้นในของเหลวที่ไม่หนืดจึงให้สัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ที่คมชัดดี

2.4 หลักการสร้างเครื่องมือ

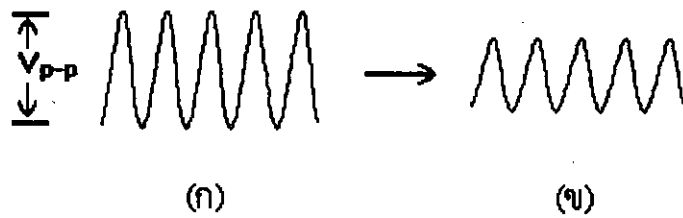
สำหรับวิธีการทดลองทางเอ็นเอ็มอาร์นั้นมี 2 วิธี คือพัลส์เอ็นเอ็มอาร์ และเอ็นเอ็มอาร์แบบคลื่นต่อเนื่อง ต่างกันที่การให้สนามความถี่สูงย่านวิทยุเข้าขดลวดทองแดงรอบสารทดลองเป็นแบบพัลส์ หรือแบบคลื่นต่อเนื่อง

สำหรับในการทดลองนี้ใช้วิธีเอ็นเอ็มอาร์แบบคลื่นต่อเนื่องโดยการนำน้ำมันมาใส่ไว้ในหลอดทดลองที่อยู่ในขดลวดทองแดงโดยมีความถี่สูงย่านวิทยุป้อนเข้าไปในขดลวดทองแดงเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กสถิต B_1 และขดลวดทองแดงจะอยู่ในสนามแม่เหล็กสถิตขนาด B_0 ซึ่งมีทิศตั้งฉากกันดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการวางขดลวดทองแดงที่ให้กำเนิดสนามแม่เหล็กสถิต B_1 ในแม่เหล็กที่ให้กำเนิดสนามแม่เหล็กสถิตขนาด B_0

เนื่องจากโปรตอนในน้ำมันแสดงตัวเหมือนเป็นโปรตอนอิสระ เมื่อปรับความถี่ f ของ B_1 ให้เข้าเงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ดังสมการที่ 2.11 โปรตอนในน้ำมันจะดูดกลืนพลังงานจากสนามแม่เหล็กสถิตมีผลทำให้ความต่างศักย์คร่อมขดลวดทองแดงถลุดดังรูปที่ 2.4 อย่างไรก็ตาม



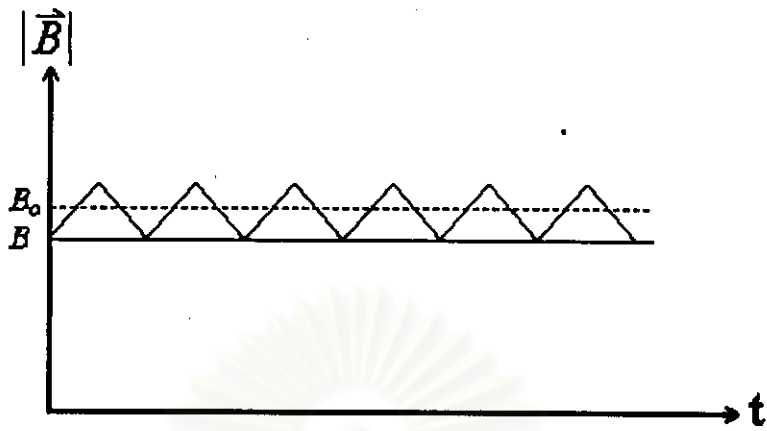
รูปที่ 2.4 (ก) แสดงความต่างศักย์ต่ำสุดถึงสูงสุดคร่อมขดลวดทองแดงก่อนการเกิดเรโซแนนซ์
(ข) แสดงความต่างศักย์ต่ำสุดถึงสูงสุดคร่อมขดลวดทองแดงขณะเกิดเรโซแนนซ์

รูปที่ 2.4 นี้แสดงให้เห็นรูปคลื่นขณะที่การดูดกลืนพลังงานยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว ถ้าถึงจุดอิ่มตัวจะไม่เกิดการดูดกลืนพลังงานในขณะเกิดเรโซแนนซ์รูปคลื่นจะกลับเป็นดังรูป 2.4(ก) ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถปรับความถี่ f และสนามแม่เหล็กสถิต ให้เข้าเงื่อนไขเรโซแนนซ์ได้พอดี จึงทำการปรับความถี่ f และสนามแม่เหล็กให้ใกล้เคียงเงื่อนไขเรโซแนนซ์มากที่สุดจากนั้นทำการกวาดสนามแม่เหล็กสถิตขนาด B ซึ่งเข้าใกล้ B_0 ขึ้นลง โดยสร้างสนามแม่เหล็กขนาดเล็กๆ B_m ซึ่งมีทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กสถิตขนาด B มามอดูเลทกับสนามแม่เหล็กสถิต B ที่ปรับไว้โดยสนามแม่เหล็กขนาด B_m นี้จะมีขนาดเพิ่มขึ้นและตกลงเป็นรูปตามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.5



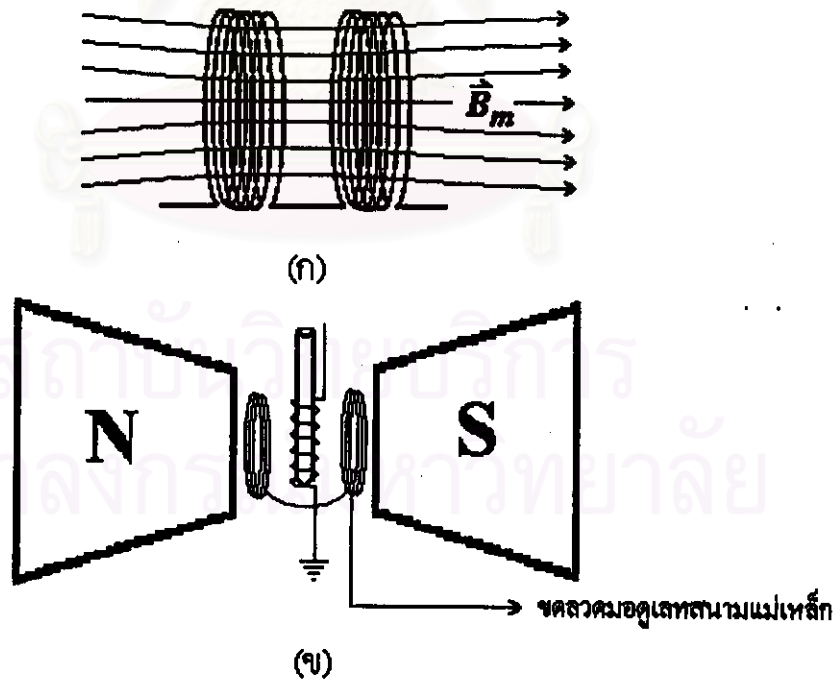
รูปที่ 2.5 แสดงการกวาดขึ้นลงของสนามแม่เหล็กขนาดเล็ก B_m ซึ่งใช้มอดูเลทกับสนามแม่เหล็กสถิต B เพื่อให้สนามแม่เหล็กกวาดผ่านจุดเรโซแนนซ์หรือผ่านจุดที่สนามแม่เหล็กมีค่า B_0 ในรูป t เป็นเวลา

เมื่อทำการมอดูเลทสนามแม่เหล็กแล้วสนามแม่เหล็กจะกวาดขึ้นลงผ่านจุดที่สนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ B_0 หรือผ่านจุดเรโซแนนซ์ดังรูปที่ 2.6



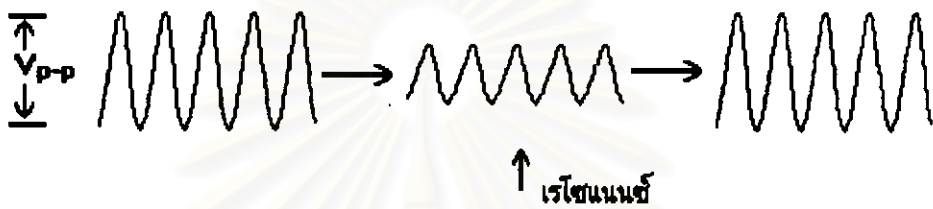
รูปที่ 2.6 แสดงการกวาดขึ้นลงของสนามแม่เหล็ก B_m ที่มอดูเลตกับสนามแม่เหล็ก B ทำให้สนามแม่เหล็กกวาดผ่านจุด B_0 ซึ่งเป็นจุดเรโซแนนซ์ ในรูป t เป็นเวลา

ในเชิงเครื่องมือนี้เราสร้างสนามแม่เหล็ก \vec{B}_m โดยการพันขดลวดทองแดงสองขดแล้วนำไปวางคร่อมขดลวดทองแดงอาร์เอฟ โดยให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางกับสนามแม่เหล็ก B ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 (ก) แสดงทิศของสนามแม่เหล็ก \vec{B}_m
 (ข) แสดงการวางขดลวดทองแดงมอดูเลตเพื่อมอดูเลตสนามแม่เหล็ก B

เมื่อสนามแม่เหล็ก B_m กวากขึ้นมาถึงจุดเรโซแนนซ์ทำให้โปรตอนดูดกลืนพลังงาน จากสนามแม่เหล็กสถิต B_1 ความต่างศักย์คร่อมขดลวดทองแดงอาร์เอฟจะลดลง และเมื่อสนามแม่เหล็ก B_m กวากผ่านจุดเรโซแนนซ์ไปความต่างศักย์คร่อมขดลวดทองแดงอาร์เอฟจะกลับมาเท่าเดิมดังรูปที่ 2.8



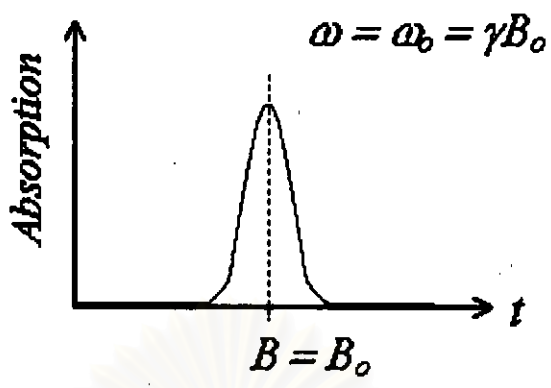
รูปที่ 2.8 แสดงรูปคลื่นสัญญาณความต่างศักย์จากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดเมื่อสนามแม่เหล็ก B_m กวากผ่านจุดเรโซแนนซ์

ในความเป็นจริงแล้วความต่างศักย์คร่อมขดลวดทองแดงอาร์เอฟจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากมีการดูดกลืนพลังงานที่ใกล้จุดเรโซแนนซ์ (Charles Kittel , 1991) ซึ่งการค่อยๆ ลดลงของความต่างศักย์คร่อมขดลวดทองแดงอาร์เอฟนี้ก็คือ สัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ นั่นเอง โดยสัญญาณจะอยู่ในลักษณะมอดูเลทกับความถี่สูงแบบ AM (Amplitude modulation) เมื่อทำการกรองความถี่สูง



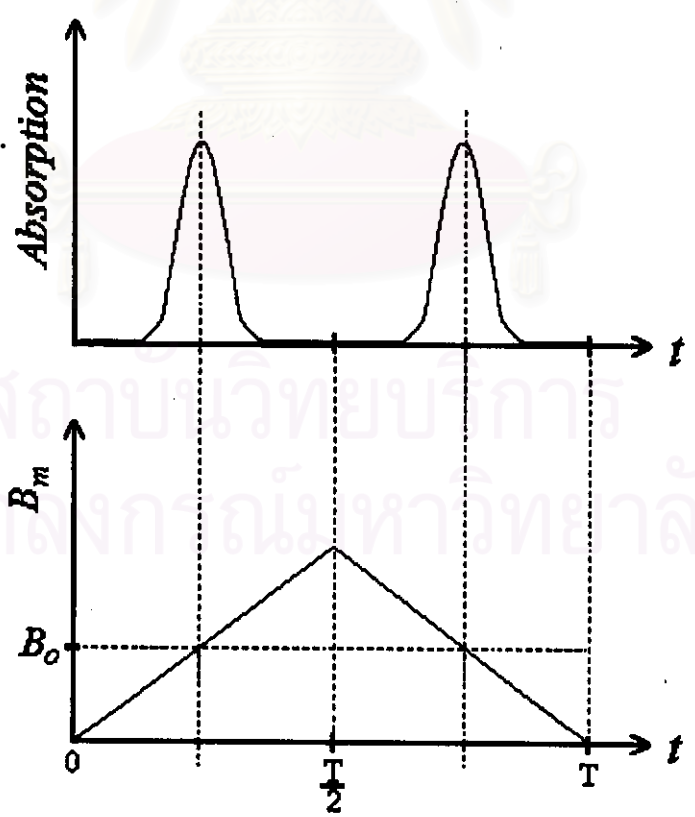
รูปที่ 2.9 แสดงสัญญาณ NMR มอดูเลทแบบ AM กับความถี่สูง (จำลอง)

ซึ่งเป็นการพาหะออกไปก็จะได้สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนพลังงาน หรือสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์นั่นเองซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10 สัญญาณการดูดกลืนพลังงานนี้เราเรียกว่า พิคสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ (NMR signal peak)



รูปที่ 2.10 แสดงสัญญาณการดูดกลืนพลังงานเมื่อเกิดเรโซแนนซ์หรือสัญญาณ NMR (จำลอง)

ในการกวาดขึ้นลง 1 รอบของสนามแม่เหล็ก \vec{B}_m จะผ่านจุดเรโซแนนซ์ 2 ครั้งซึ่งจะได้ พิกัดสัญญาณ 2 พิกัดดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นการแยกของพีคการดูดกลืนทั้งสองจึงขึ้นอยู่กับความถี่ของ สนามแม่เหล็กสลับ B_1 ที่เกิดจากขดลวดมอดูเลท ความสูงของพิกัดสัญญาณโปรตอนเอ็นเอ็มอาร์



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดพิกัดสัญญาณ NMR ในการกวาด 1 รอบของสนามแม่เหล็ก \vec{B}_m

นี้จะแปรผันตามจำนวนโปรตอนซึ่งอยู่ในน้ำมันข้าวโพดที่อยู่ในหลอดทดลอง หรือแปรผันตามปริมาณน้ำมันข้าวโพดในเมล็ดข้าวโพดในหลอดทดลองนั่นเอง ดังนั้นถ้าทราบปริมาณน้ำมันข้าวโพดสำหรับเปรียบเทียบและทราบความสูงของพีกสัญญาณก็จะสามารถใช้เป็นตัวเปรียบเทียบหาปริมาณน้ำมันในเมล็ดข้าวโพดได้ ในทางการทดลองเราวัดความสูงของพีกสัญญาณในหน่วยของโวลต์

ถ้าให้ m เป็นมวลของน้ำมันข้าวโพด มีหน่วยเป็นกรัม (g)

h เป็นความสูงของพีกสัญญาณ NMR มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

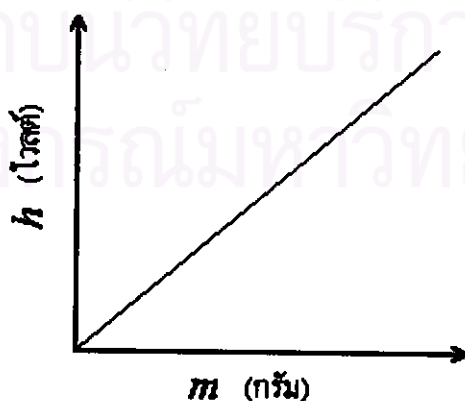
เนื่องจาก $h \propto m$ จะได้ว่า

$$h = km \quad (2.13)$$

$$k = \frac{h}{m} \quad (2.14)$$

k คือค่าคงที่อัตราส่วนสัญญาณต่อปริมาณน้ำมันข้าวโพด

สำหรับค่า k อาจหาได้จากกราฟโดยการทดลองนำปริมาณน้ำมันข้าวโพดที่ทราบค่าหลายๆ ปริมาณมาทำการวัดค่าความสูงของสัญญาณแต่ละปริมาณแล้วนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.12



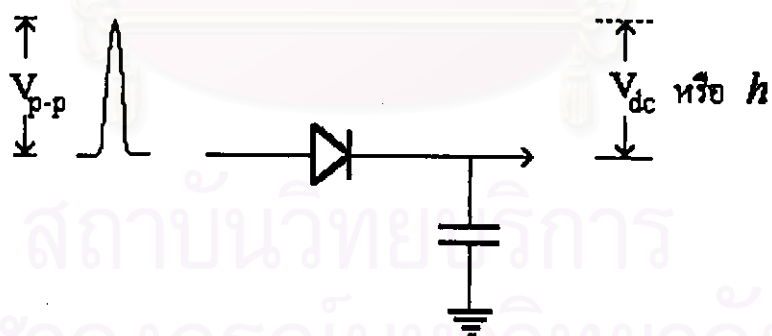
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของสัญญาณ NMR หรือ h กับมวลของน้ำมันข้าวโพด (m)

ค่า k หาได้จากความชันของกราฟ เมื่อได้ค่า k ในการหาปริมาณน้ำมันในเมล็ดข้าวโพดก็สามารถหาได้ดังสมการ

$$m = \frac{h}{k} \quad (2.15)$$

ปริมาณน้ำมันในเมล็ดข้าวโพดก็คือความสูงของสัญญาณหารด้วยค่าคงที่อัตราส่วนความสูงสัญญาณ NMR ต่อปริมาณน้ำมันข้าวโพดนั่นเอง ซึ่งมีหน่วยเป็นกรัม

ในเชิงเครื่องมือเราสามารถทราบความสูงของสัญญาณ NMR ได้จากวงจรตรวจจับความสูงของพีค (peak voltage detector) วงจรนี้ทำการออกแบบให้ตรวจจับความสูงเฉพาะด้านบวกของสัญญาณ NMR โดยเอาท์พุทของวงจรจะให้ไฟตรงที่มีค่าเฉลี่ยประมาณความสูงของพีคสัญญาณ วงจรแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรวัดความสูงของพีคสัญญาณ NMR (peak voltage detector) และแสดงผลอยู่ในรูปไฟตรง

จากรูปที่ 2.13 เอาท์พุทของวงจรก็คือค่าความสูงของสัญญาณ NMR หรือ h ถ้านำปริมาณน้ำมันข้าวโพดหลายๆ ปริมาณมาวัดแล้วทำการเขียนกราฟและหาค่า k ดังรูปที่ 2.12 ก็จะ

สามารถวัดปริมาณน้ำมันที่ไม่ทราบค่าได้ดังสมการที่ 2.15 ซึ่งเราสามารถสร้างวงจรหารเพื่อนำค่าความสูงของสัญญาณ NMR มาหารด้วยค่า k ที่หาได้จากกราฟ

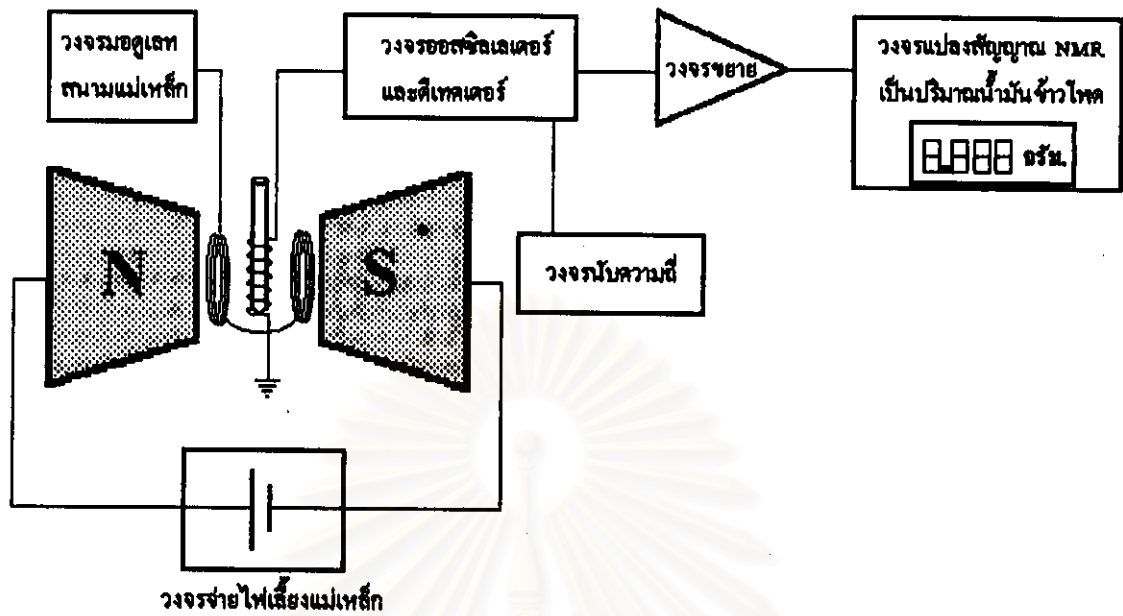


รูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนค่าความสูงสัญญาณ NMR เป็นปริมาณน้ำมันโดยใช้วงจรหารด้วยค่า k

จากรูปที่ 2.14 เมื่อนำค่าความสูงสัญญาณ NMR หรือ h เข้าวงจรหารด้วย k แล้วผลลัพธ์ที่ออกมาคือค่าความต่างศักย์ซึ่งมีค่าตัวเลขเท่ากับปริมาณน้ำมันข้าวโพดที่ต้องการวัดนั่นเอง สามารถออกแบบวงจรให้หน่วยเทียบความต่างศักย์ 1 โวลต์ ให้เท่ากับปริมาณน้ำมัน 1 กรัม หรือ 1 มิลลิโวลต์ เท่ากับ 1 มิลลิกรัม ตัวอย่างเช่นถ้าโวลต์มิเตอร์อ่านค่าได้ 13 มิลลิโวลต์ แสดงว่าปริมาณน้ำมันที่วัดได้คือ 13 มิลลิกรัม หรือโวลต์มิเตอร์อ่านได้ 20 มิลลิโวลต์ แสดงว่าปริมาณน้ำมันที่วัดได้คือ 20 มิลลิกรัม

จากหลักการที่กล่าวมาแล้วสามารถเขียนรูปแสดงวงจรการทำงานของเครื่องมือเพื่อวัดปริมาณน้ำมันในเมล็ดข้าวโพด คร่าวๆ ได้ดังรูปที่ 2.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 หั่งชุดวัดปริมาณน้ำมันในเม็ดข้าวโพค

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่ามีชุดอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญคือ

1. เครื่องกำเนิดความถี่สูงย่านอาร์เอฟและวงจรตรวจจับการดูดกลืนพลังงานของโปรตอนในน้ำมันข้าวโพคจากการเรโซแนนซ์
2. วงจรไฟเลี้ยงแม่เหล็กไฟฟ้า
3. วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็ก B_m เพื่อสอดดูเลทสนามแม่เหล็ก B
4. วงจรขยายสัญญาณ NMR
5. วงจรแปลงสัญญาณ NMR เป็นปริมาณน้ำมันข้าวโพค
6. วงจรนับความถี่

จะทำการอธิบายวงจรทั้งหมดนี้คือ ไปในบทที่ 3