

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
สารบัญอักษรย่อ	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พื้นฐานการตอบสนองของวัตถุต่อสนามแม่เหล็ก (Magnetic Susceptibility)	4
2.2 แบบของการตอบสนองของอิเล็กตรอนต่อสนามแม่เหล็ก (Type of Magnetism)	5
2.2.1 ไดอะแมกเนติก (Diamagnetism)	5
2.2.2 พาราแมกเนติก (Paramagnetism)	6
2.2.3 เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetism)	8
2.3 การผ่อนคลาย (Relaxation time) ภายใต้เครื่องเอ็มอาร์ไอ	8
2.3.1 กลไกการผ่อนคลาย (Mechanism of Relaxation)	9
2.3.2 ค่าเวลาการผ่อนคลาย T1 (T1 Relaxation time)	11
2.3.3 ค่าเวลาการผ่อนคลาย T2 และ T2* (T2, T2* Relaxation time)	12
2.4 ธาตุเหล็กในร่างกาย	
2.4.1 การกระจายตัวของธาตุเหล็กในร่างกายในภาวะปกติ	13
2.4.2 การดูดซึมเหล็ก (iron absorption)	14
2.4.3 เมตาบอลิซึมของเหล็ก (iron metabolism)	14

2.5	โรคโลหิตจางขาดซีเมีเยและภาวะเหล็กเกินในกล้ามเนื้อหัวใจ	15
2.6	วิธีการประเมินภาวะเหล็กเกินในกล้ามเนื้อหัวใจ	16
2.7	วิธีการประเมินภาวะเหล็กเกินในกล้ามเนื้อหัวใจด้วยเทคนิค T2* magnetic resonance	17
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย		
3.1	วัสดุอุปกรณ์	20
3.2	วิธีการศึกษา	21
3.2.1	การศึกษาในหุ่นจำลอง (Phantom study)	21
3.2.1.1	ศึกษาการเพิ่มจำนวนครั้งของการเก็บสัญญาณแล้วหาค่าเฉลี่ย (number of signals averaged, NSA) ต่อคุณภาพ ของภาพเอ็มอาร์	22
3.2.1.2	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ (ferric chloride) กับค่า R2* (1000/T2*)	22
3.2.1.3	ศึกษาความสามารถในการให้ค่า T2* ที่เหมือนเดิม (Reproducibility of T2* value)	22
3.2.2	การศึกษาในกลุ่มอาสาสมัคร (Human subject study)	
3.2.2.1	การคัดเลือกกลุ่มอาสาสมัคร	23
3.2.2.2	ศึกษาความสามารถในการให้ค่า T2* ที่เหมือนเดิม (Reproducibility of T2* value)	23
3.3	การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้	25
บทที่ 4 ผลการศึกษา		
4.1	ผลการศึกษาในหุ่นจำลอง	
4.1.1	ผลของการเพิ่มจำนวนครั้งของการเก็บสัญญาณแล้วหาค่าเฉลี่ย (number of signals averaged, NSA) ต่อคุณภาพของภาพเอ็มอาร์	26
4.1.2	ผลศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ (ferric chloride) กับค่า R2* (1000/T2*)	27
4.1.3	ผลศึกษาความสามารถในการให้ค่า T2* ที่เหมือนเดิม (Reproducibility)	30
4.2	ผลการศึกษาในกลุ่มอาสาสมัครสุขภาพดี	33

4.2.1 ผลการเปรียบเทียบ SNR ของภาพเอ็มอาร์ที่ได้จากเทคนิค Breath hold และ Free breathing	33
4.2.2 ผลการศึกษาความสามารถในการให้ค่า T2* ที่เหมือนเดิมในอาสาสมัครสุขภาพดีจากการสร้างภาพสองครั้ง (Inter-study Reproducibility)	35
4.2.3 เปรียบเทียบค่า T2* จากการฟิตกราฟแบบ mono-exponential และ offset	37
4.2.4 ผลการศึกษาการให้ค่า T2* ที่เหมือนเดิมจากผู้วิเคราะห์ข้อมูลสองคน (Inter – observer Reproducibility)	39
4.3 ผลการศึกษาในกลุ่มอาสาสมัครชาตัสซีเมียเมเจอร์	41
4.3.1 ผลการศึกษาความสามารถในการให้ค่า T2* ที่เหมือนเดิม	42
4.3.2 เปรียบเทียบค่า T2* จากการฟิตกราฟแบบ mono-exponential, truncation และ offset	43
บทที่ 5 วิจัยและสรุปผลการทดลอง	45
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลสำหรับผู้ป่วยหรืออาสาสมัคร	56
ภาคผนวก ข หนังสือแสดงความยินยอมการเข้าร่วมในโครงการวิจัย	59
ภาคผนวก ค ค่า T2* ของอาสาสมัครสุขภาพดี	60
ภาคผนวก ง ค่า susceptibility ของธาตุ และสารประกอบอนินทรีย์ต่างๆ	62
ประวัติผู้เขียน	72

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 รูปแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอิเล็กตรอน	5
2 จำนวนของอิเล็กตรอนที่อยู่แบบเดี่ยวๆ ของอนุภาคแบบโลหะทรานซิชัน (Transition metal) และ โลหะแลนทาไนด์ (Lanthanide metal)	7
3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างภาพเอ็มอาร์ในหุ่นจำลองและหัวใจ	21
4 แสดงค่าเวลาในการสร้างภาพ (Scan time), SNR, %CV, Normalize SNR และ Normalize %CV ของภาพเอ็มอาร์หุ่นจำลอง ที่ทำการเพิ่ม NSA ตั้งแต่ 1 ถึง 32	26
5 แสดงค่า T2* จากข้อมูลภาพที่ 1 และ 6 NSA ในหุ่นจำลองที่ระดับความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ต่างๆ พล็อตกราฟแบบ mono-exponential, truncation และ offset	28
6 แสดงค่า R2* จากข้อมูลภาพที่ 1 และ 6 NSA ในหุ่นจำลองที่ระดับความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ต่างๆ พล็อตกราฟแบบ mono-exponential, truncation และ offset	29
7 แสดงค่า T2* จากข้อมูลภาพที่ 1 NSA ทั้งสองครั้งในหุ่นจำลอง ที่ระดับความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ต่างๆ พล็อตกราฟแบบ mono-exponential, truncation และ offset	30
8 แสดงค่า T2* จากข้อมูลภาพที่ 6 NSA ทั้งสองครั้งในหุ่นจำลอง ที่ระดับความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ต่างๆ พล็อตกราฟแบบ mono-exponential, truncation และ offset	32
9 แสดงค่าเฉลี่ยของ SNR บนภาพเอ็มอาร์หัวใจจากเทคนิค Free breathing และ Breath hold ที่เวลา TE 1.70 ถึง 26.10 มิลลิวินาที	33
10 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า T2* จากภาพเอ็มอาร์หัวใจ อาสาสมัครสุขภาพดี สร้างภาพด้วยเทคนิค Breath hold พล็อตกราฟแบบ mono-exponential และ offset	36
11 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า T2* จากภาพเอ็มอาร์หัวใจในอาสาสมัครสุขภาพดี สร้างภาพด้วยเทคนิค Free breathing พล็อตกราฟแบบ mono-exponential และ offset	38

- 12 แสดงค่าเฉลี่ย และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า T2* จากภาพเอ็มอาร์หัวใจ
อาสาสมัครสุขภาพดี สร้างภาพด้วยเทคนิค Breath hold และ เทคนิค Free
breathing พล็อตกราฟแบบ mono-exponential และ offset 39
- 13 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ เปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของค่า
T2* จากภาพเอ็มอาร์หัวใจอาสาสมัครสุขภาพดี สร้างภาพด้วยเทคนิค Free
breathing และ เทคนิค Breath hold จากผู้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลสองคน พล็อต
กราฟแบบ mono-exponential 40
- 14 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ เปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของค่า
T2* จากภาพเอ็มอาร์หัวใจอาสาสมัครสุขภาพดี สร้างภาพด้วยเทคนิค Free
breathing และ เทคนิค Breath hold จากผู้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลสองคน พล็อต
กราฟแบบ offset 40
- 15 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า T2* จากภาพเอ็มอาร์หัวใจใน
อาสาสมัครชาลีสซีเมีย สร้างภาพด้วยเทคนิค Breath hold พล็อตกราฟแบบ
mono-exponential, truncation และ offset 42
- 16 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า T2* จากภาพเอ็มอาร์หัวใจ สร้าง
ภาพด้วยเทคนิค Breath hold สองครั้ง พล็อตกราฟด้วยโมเดล mono-
exponential, truncation และ offset 44

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1 การตอบสนองของวัตถุต่อสนามแม่เหล็กแบบลบ (Negative) เป็นคุณสมบัติของสารแบบไดอะแมกเนติก การตอบสนองแบบบวก (Positive) เป็นคุณสมบัติของสารแบบพาราแมกเนติก ซูเปอร์พาราแมกเนติก และเฟอโรแมกเนติก (H คือสนามแม่เหล็กภายนอก และ I คือการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยอิเล็กตรอน)	6
2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการตอบสนองของอิเล็กตรอนสำหรับสารพาราแมกเนติก และ ซูเปอร์พาราแมกเนติก	7
3 การตอบสนองของโปรตอนต่อการกระตุ้นด้วย RF pulse ซึ่งมีขบวนการผ่อนคลายสองแบบ คือ แบบที่มีการคายพลังงานสปินแลตทิซ (T2) และแบบที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกันสปินสปิน (T2) ซึ่งเกิดขึ้นขณะเดียวกัน	8
4 การตอบสนองของแมกเนไทเซชันต่อการกระตุ้นด้วย RF pulse ซึ่งมีขบวนการผ่อนคลายสองแบบ คือ แบบที่มีการคายพลังงานสปินแลตทิซ (T1) และแบบที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกันสปินสปิน (T2)	9
5 สัดส่วนของจำนวนโมเลกุล $P(\omega_c)$ ทั้งสามแบบ โมเลกุลขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก ต่อความถี่ในการเคลื่อนไหวของโมเลกุล ω_c และความถี่ในการกำทอน ω_L	10
6 ผลของความถี่ในการเคลื่อนไหวของโมเลกุลต่อค่าการผ่อนคลาย T1 และ T2 โดยที่น้ำบริสุทธิ์จะมีค่า T1 และ T2 ที่ยาว (ในย่าน A) น้ำที่เกาะกับโปรตีนจะมีค่า T1 ที่สั้น และมีค่า T2 ปานกลาง (ในย่าน B) สำหรับของแข็งหรือโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีค่า T1 ที่ยาว และ T2 ที่สั้น (ในย่าน C)	13
7 ผังภาพแสดงการทำงานของลำดับพัลส์ตามเวลา (timing diagram) ของลำดับพัลส์เกรเดียนท์มัลติเอคโค (GRE multi-echoes) เก็บสัญญาณเพื่อสร้างภาพจำนวน 10 Echo time	19
8 เกลที่ทำกรเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferricchloride, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$) ให้มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 8 ความเข้มข้น ในภาชนะที่ผลิตขึ้น	20
9 แสดงการวาด ROI เพื่อวิเคราะห์ค่า SNR พื้นที่สี่เหลี่ยมใช้หาค่าความเข้มของสัญญาณภาพและพื้นที่ในวงกลม (ลูกศรสีขาว) ใช้หาค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise)	24
10 กราฟแสดงค่า SNR ที่เพิ่มขึ้นและค่า %CV ที่ลดลงบนภาพเอ็มอาร์เมื่อเพิ่ม NSA ตั้งแต่ 1 ถึง 32	27

11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์กับค่า T2* จากข้อมูลภาพที่ 1 NSA (ก.) และ 6 NSA (ข.) พืดกราฟแบบ mono-exponential, truncation และ offset	28
12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์กับค่า R2* จากข้อมูลภาพที่ 1 NSA (ก.) และ 6 NSA (ข.) พืดกราฟแบบ mono-exponential, truncation และ offset	29
13	พลอตแบบ Bland-Altman เปรียบเทียบค่า T2* ในหุ่นจำลองที่ได้จากข้อมูลภาพที่ 1 NSA จากการศึกษาสองครั้ง พืดกราฟแบบ mono-exponential (ก.) truncation (ข.) และ offset (ค.) เส้นปะแสดงช่วงผลต่างของค่า T2* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	31
14	พลอตแบบ Bland-Altman เปรียบเทียบค่า T2* ในหุ่นจำลองที่ได้จากข้อมูลภาพที่ 6 NSA จากการศึกษาสองครั้ง พืดกราฟแบบ mono-exponential (ก.) truncation (ข.) และ offset (ค.) เส้นปะแสดงช่วงผลต่างของค่า T2* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	32
15	แสดงค่าเฉลี่ยของ SNR บนภาพเอ็มอาร์หัวใจที่ TE เท่ากับ 1.70 มิลลิวินาที ถึง 26.10 มิลลิวินาที จากเทคนิค Free breathing และ Breath hold	34
16	ตัวอย่างภาพเอ็มอาร์หัวใจอาสาสมัครสุขภาพดีจากเทคนิค Free breathing ด้านซ้ายมือ และ Breath hold ด้านขวามือ ที่เวลา TE เท่ากับ 1.70 มิลลิวินาที	34
17	พลอตแบบ Bland-Altman เปรียบเทียบค่า T2* ในอาสาสมัครสุขภาพดีที่ได้จากเทคนิค Breath hold ระหว่างครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สองพืดกราฟแบบ mono-exponential (ก.) และ offset (ข.) เส้นปะแสดงช่วงผลต่างของค่า T2* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	36
18	พลอตแบบ Bland-Altman เปรียบเทียบค่า T2* ในอาสาสมัครสุขภาพดีที่ได้จากเทคนิค Free breathing ระหว่างครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สองพืดกราฟแบบ mono-exponential (ก.) และ offset (ข.) เส้นปะแสดงช่วงผลต่างของค่า T2* ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	38
19	ภาพแนวแบ่งหน้าหลัง (coronal view) บริเวณทรวงอกต่อช่องท้องส่วนบนของอาสาสมัครสุขภาพดี (ก.) และ อาสาสมัครชาลัสซีเมียเมเจอร์ (ข.)	41
20	แสดงการวาด ROI บริเวณผนังกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้ายต่อห้องล่างขวา (left mid ventricular septum) บนภาพหัวใจจากเทคนิค Breath hold เพื่อทำการวัดค่า T2*	41

- 21 พล็อตแบบ Bland-Altman เปรียบ เทียบค่า $T2^*$ ในอาสาสมัครชาลัสซีเมียที่ได้จากเทคนิค Breath hold ระหว่างครั้งที่หนึ่งและ ครั้งที่สองพีตกราฟแบบ mono-exponential (ก.), truncation (ข.) และ offset (ค.) เส้นปะแสดงช่วงผลต่างของค่า $T2^*$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญย่อ

cm	Centimeter
%CV	Percentage Coefficient of Variation
ECG	Electro Cardiogram
GRE	Gradient Recall Echo
mm	Millimeter
ms	Millisecond
MRI	Magnetic Resonance Imaging
Mxy	Transverse Magnetization
Mz	Longitudinal Magnetization
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
NSA	Number of Signal Average
R2*	Transverse relaxation rate
ROI	Region Of Interest
SD	Standard Deviation
RF	Radio Frequency
SI	Signal Intensity
SNR	Signal to Noise Ratio
T1	Longitudinal relaxation time
T2, T2*	Transverse relaxation time
TE	Echo Time
TR	Repetition time