

ผลการทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำ

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำจะมีความสัมพันธ์กับทางไฟฟ้าในด้าน โครงสร้าง วงจรไฟฟ้าและการควบคุม และมีความสัมพันธ์กับทางโลหวิทยา ในด้านความแข็งของชิ้นงาน ทั้งก่อนและหลังจากผ่านการชุบแข็ง ในการทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำที่สร้างขึ้น จึงแบ่งการทดสอบออกเป็น

4.1 การทดสอบทางโลหวิทยา

จากเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำที่สร้างขึ้น สามารถทดสอบผลทางโลหวิทยา โดยนำเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวน้ำไปชุบแข็งชิ้นงานประเภทเหล็กผสมคาร์บอน ที่มีลักษณะ เป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร และทดสอบกับชิ้นงานประเภท ต่างๆจำนวน 4 ชนิด เนื่องจากขั้นตอนในการวัดความแข็งของชิ้นงาน จะต้องมีการเตรียม ชิ้นงานโดยการขัดผิวชิ้นงาน ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากและเสียเวลามาก ในการทดสอบจึงทดสอบที่ ความถี่เดียว ในกรณีนี้เลือกความถี่ 135 กิโลเฮิรตซ์ ชิ้นงานแต่ละชนิดจะได้รับการชุบแข็ง ในเวลาแตกต่างกัน จาก 5 วินาที 10 วินาที 15 วินาที และ 20 วินาที ในช่วงที่ชิ้นงานได้ รับความร้อนจะวัดอุณหภูมิที่ชิ้นงานนั้นโดยใช้ ออปติคัลไพโรมิเตอร์วัด ในการชุบแข็งชิ้นงาน จะใช้น้ำในการทำให้ชิ้นงานที่ร้อนเย็นลงโดยฉับพลัน การวัดความแข็งของชิ้นงานจะวัดที่ระยะ ใดๆจากผิวโดยจะวัดที่ระยะ 0.2 มิลลิเมตร ถึง 2 มิลลิเมตรและเพิ่มครั้งละ 0.2 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 10 ค่า เนื่องจากระยะห่างแต่ละจุดที่ต้องการวัดมีค่าน้อยจึงต้อง ใช้เครื่องวัดที่มีความละเอียดเพียงพอ ในกรณีนี้จึงใช้ ไมโครวิคเกอร์ จากผลการทดสอบสามารถวัดความแข็ง ของชิ้นงานที่ชุบกับระยะจากผิวของชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.1 ถึง ตารางที่ 4.4 สำหรับชิ้นงาน ชนิดที่ 1 ถึงชิ้นงานชนิดที่ 4 ตามลำดับ และข้อมูลของชิ้นงานทั้ง 4 ชนิดแสดงดังตารางที่ 4.5

จากผลการวัดที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความแข็งของชิ้นงาน และ ระยะความลึกจากผิวชิ้นงานโดยมีเวลาเป็นตัวพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.4 ตาม ลำดับจากชิ้นงานชนิดที่ 1 ถึงชิ้นงานชนิดที่ 4 จากรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4 พบว่าในชิ้นงาน ลักษณะเดียวกัน ถ้าระยะเวลาการให้ความร้อนนานขึ้นชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เช่น

ระยะจากผิว (mm)	ความแข็ง (Hv)				
	ก่อนชุบ	5 sec	10 sec	15 sec	20 sec
0.2	225	470	473	605.5	663
0.4	240	473	480	605	677
0.6	232	444	480	633	677
0.8	226	441	487	713	716.5
1.0	226	433.5	518	701	701
1.2	234	336	498	646.5	701
1.4	241	281	419	630	689
1.6	227	264	419	605.5	689
1.8	227	271	299	593	672
2.0	224	244	264	590.5	633
ตรงกลาง	226	226	244	380	529

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 1

ระยะจากผิว (mm)	ความแข็ง (Hv)				
	ก่อนชุบ	5 sec	10 sec	15 sec	20 sec
0.2	179	412	-	528	660
0.4	183	386	-	544	689
0.6	204	366	-	605.8	666
0.8	189.5	362	-	630.5	666
1.0	199	307	-	605.8	649
1.2	191	299	-	588	649
1.4	205	310	-	557	644
1.6	218	286	-	549	618
1.8	210	257	-	528	618
2.0	205	285	-	540	600
ตรงกลาง	197	230	-	376	524

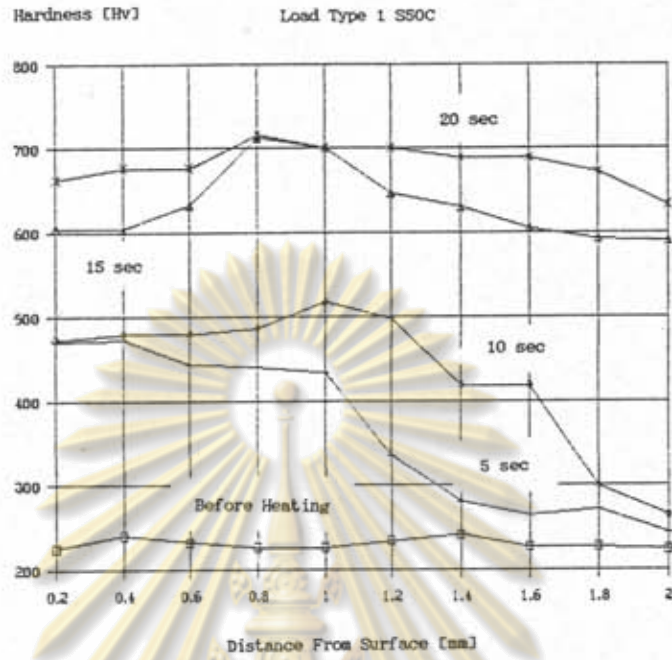
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 2

ระยะจากผิว (mm)	ความแข็ง (Hv)				
	ก่อนชุบ	5 sec	10 sec	15 sec	20 sec
0.2	226	-	-	649	700
0.4	230	-	-	672	749
0.6	235	-	-	677	749.5
0.8	220	-	-	695	780
1.0	221	-	-	683	753
1.2	240	-	-	683	753
1.4	230	-	-	649	739
1.6	227	-	-	635	733
1.8	231	-	-	612	729.5
2.0	228	-	-	600	713
ตรงกลาง	226	-	-	244	710

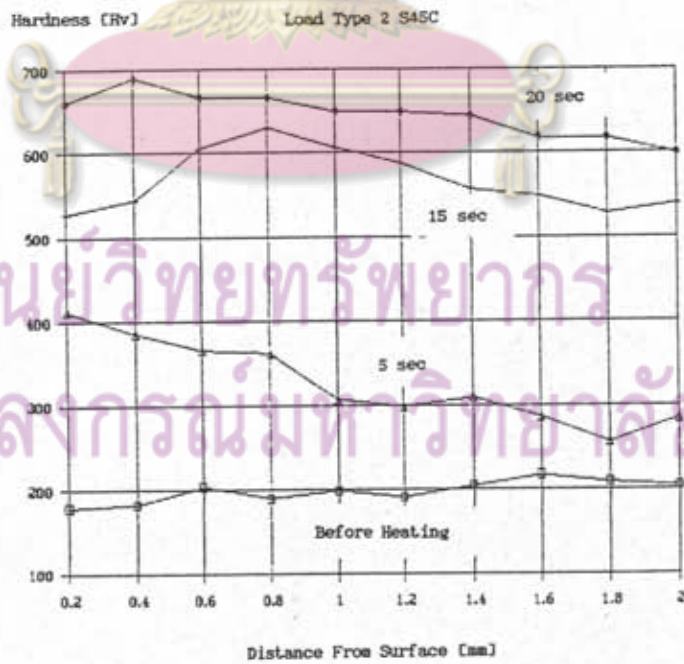
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 3

ระยะจากผิว (mm)	ความแข็ง (Hv)				
	ก่อนชุบ	5 sec	10 sec	15 sec	20 sec
0.2	176	-	-	407	448.5
0.4	187	-	-	396	470
0.6	182	-	-	432	487
0.8	163	-	-	426	470
1.0	162	-	-	412	463
1.2	181	-	-	409	455
1.4	179	-	-	386	457
1.6	178	-	-	380	444
1.8	171	-	-	379	441
2.0	169	-	-	367	430.5
ตรงกลาง	172	-	-	244	404

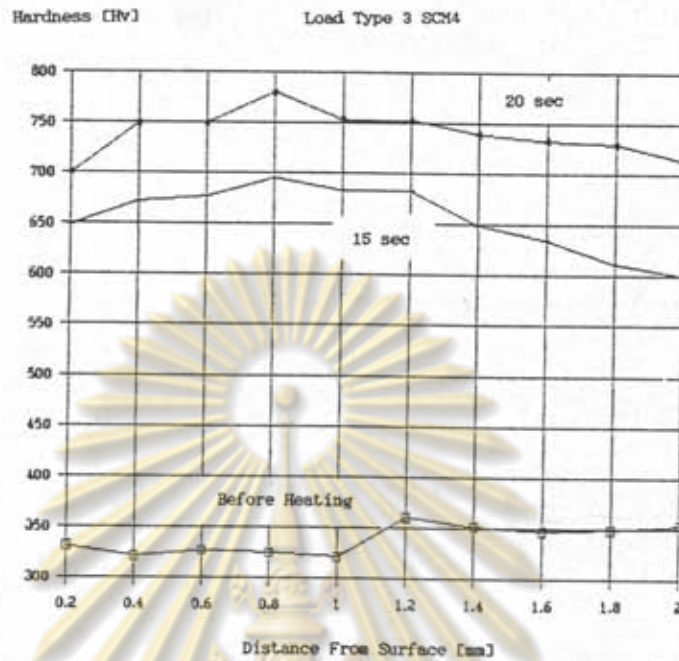
ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 4



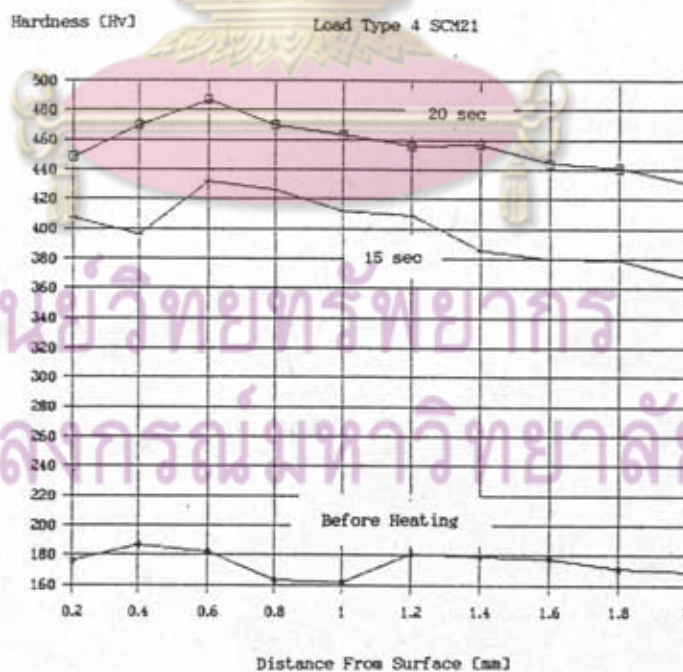
รูปที่ 4.1 ความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 1 หลังจากผ่านการชุบแข็ง



รูปที่ 4.2 ความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 2 หลังจากผ่านการชุบแข็ง



รูปที่ 4.3 ความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 3 หลังจากผ่านการชุบแข็ง



รูปที่ 4.4 ความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 4 หลังจากผ่านการชุบแข็ง

ชิ้นงานชนิดที่ 1 ถ้าระยะเวลาในการให้ความร้อนเป็น 20 วินาที จะมีความแข็งกว่าชิ้นงานที่มีระยะเวลาในการให้ความร้อน 15 วินาที และถ้าพิจารณาจากค่าที่วัดได้พบว่าถ้าระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานมากไป ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งที่ค่อนข้างลึก เช่นชิ้นงานชนิดที่ 1 ที่มีระยะเวลาในการรับความร้อน 20 วินาที และ 15 วินาที บริเวณของศูนย์กลางชิ้นงานจะมีความแข็งเปลี่ยนไปจากก่อนการชุบแข็งเป็นอันมาก ซึ่งเป็นการผิดจุดประสงค์ในการชุบแข็งผิวชิ้นงาน เพราะในการชุบแข็งชิ้นงานจะต้องการความแข็งเพียงที่ผิว ที่บริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานจะต้องมีความแข็งค่อนข้างคงเดิม จึงเห็นว่าในการชุบแข็งชิ้นงานจะต้องเลือกระยะเวลาที่ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างเหมาะสมสำหรับชิ้นงานแต่ละประเภท และถ้าระยะเวลาที่ชิ้นงานได้รับความร้อนมีค่าต่ำเกินไปแล้ว ชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งอาจมีความแข็งในระดับที่ต่ำกว่าที่ต้องการก็ได้ เช่นที่ระยะเวลา 5 วินาที ถึงแม้ชิ้นงานจะได้รับความร้อนจนร้อนแดง แต่ความแข็งที่วัดได้มีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานยังไม่สามารถเปลี่ยนเป็น Martensite

ชิ้นงานประเภทที่	ชื่อทางการค้า	ส่วนประกอบ (%)				
		C	Si	Mn	Cr	Mo
1	S50C	0.5	0.25	0.75	0.03	0.035
2	S45C	0.45	0.25	0.75	0.03	0.035
3	SCM4	0.40	0.25	0.8	1.0	0.2
4	SCM21	0.15	0.25	0.8	1.0	0.2

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลของชิ้นงานทั้ง 4 ประเภท

นอกจากนี้พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่ได้ยังขึ้นกับส่วนประกอบของชิ้นงานนั้น เช่นชิ้นงานชนิดที่ 1 มีส่วนประกอบธาตุคาร์บอน 0.5 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานชนิดที่ 2 มีส่วนประกอบธาตุคาร์บอน 0.45 เปอร์เซ็นต์ และส่วนประกอบอื่นมีเปอร์เซ็นต์เท่ากัน ถ้าพิจารณาจากรูปพบว่าที่เวลาใดๆ ชิ้นงานชนิดที่ 1 มีแนวโน้มมีความแข็งกว่าชิ้นงานชนิดที่ 2 หรือถ้าพิจารณาชิ้นงานชนิดที่ 3 และชิ้นงานชนิดที่ 4 พบว่าชิ้นงานทั้งสองชนิดมีส่วนประกอบที่เหมือนกัน เพียงแต่ชิ้นงานชนิดที่ 3 มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบมากกว่า ทำให้ชิ้นงานชนิดที่ 3 มีความแข็งมากกว่าชิ้นงานชนิดที่ 4

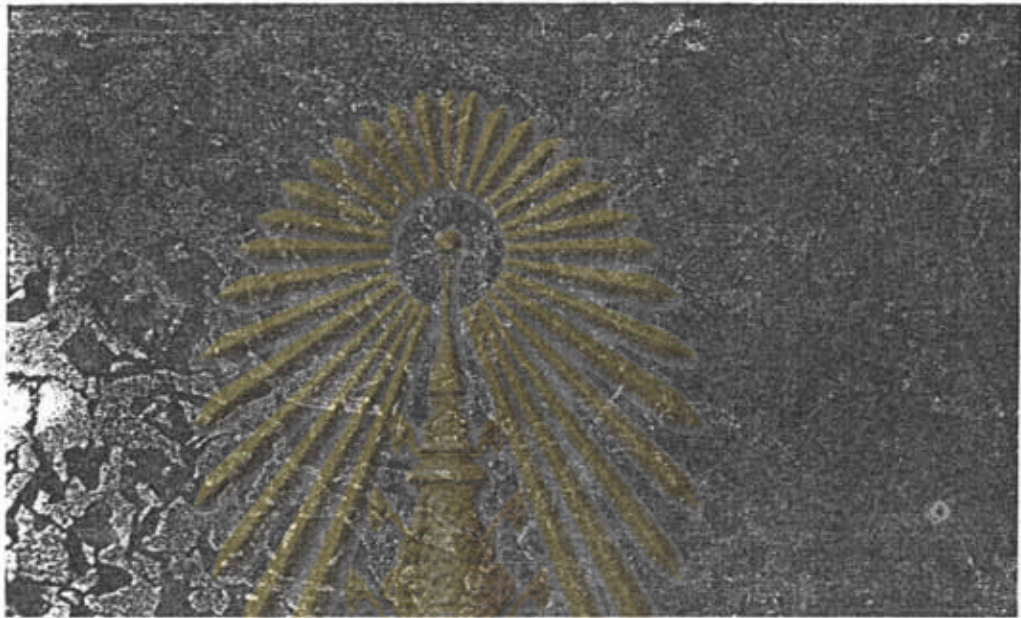
นอกจากส่วนประกอบของธาตุคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบของชิ้นงาน ที่มีผลต่อความ

แข็งของชิ้นงานแล้ว ส่วนประกอบอื่นอาจมีผลต่อความแข็งของชิ้นงานเช่นกันเช่นชิ้นงานชนิดที่ 3 จะมีความแข็งมากกว่าชิ้นงานชนิดที่ 1 และชิ้นงานชนิดที่ 2 ถึงแม้ว่าจะมีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบน้อยกว่าก็ตามแต่มีธาตุอื่นเช่น แมงกานีส โครเมียม และโมลิบดีนัม ที่มากกว่า

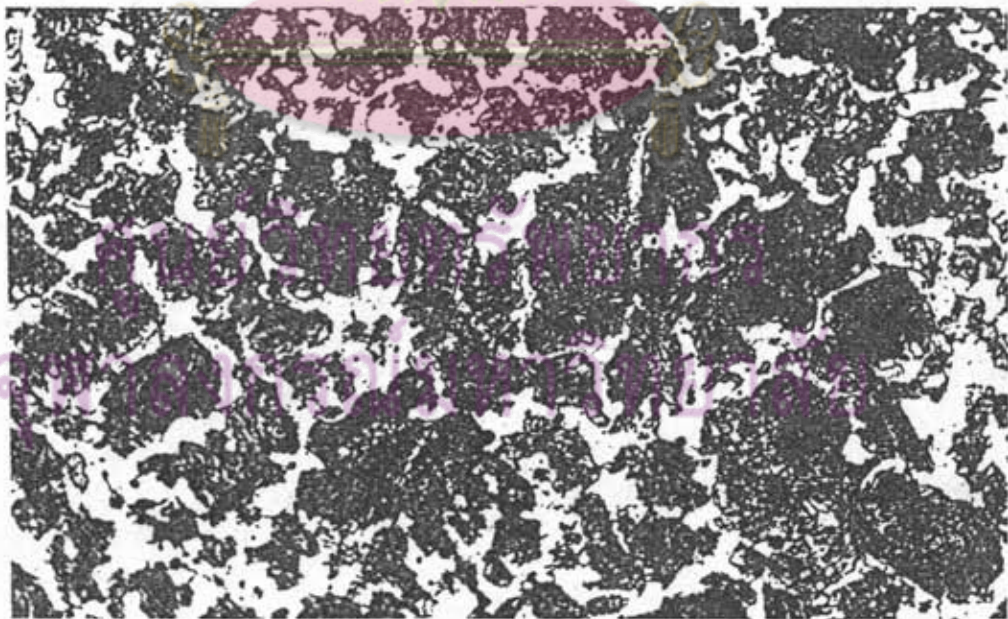
ในการทดสอบความแข็งของชิ้นงานชนิดต่างๆ ได้ถ่ายภาพโครงสร้างทางโลหวิทยาของชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง และหลังจากชิ้นงานผ่านการชุบแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.21 โครงสร้างก่อนการชุบแข็งของชิ้นงานทั้ง 4 ชนิดแสดงดังรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.8 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากผ่านการชุบแข็งเป็นเวลา 5 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.9 ถึง รูปที่ 4.12 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากผ่านการชุบแข็งเป็นเวลา 15 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.16 และโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากผ่านการชุบแข็งเป็นเวลา 20 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.20 โดยรูปที่แสดงเป็นภาพขยายขนาด 200 เท่า

ถ้าพิจารณาโครงสร้างทางโลหวิทยาของชิ้นงานชนิดที่ 1 และชิ้นงานชนิดที่ 2 ก่อนการชุบแข็งพบว่าโครงสร้างจากภาพถ่ายจะมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากชิ้นงานชนิดที่ 1 และชิ้นงานชนิดที่ 2 จะมีธาตุที่เป็นส่วนประกอบเหมือนกันหมด เพียงแต่ชิ้นงานชนิดที่ 1 มีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอน 0.5% แต่ชิ้นงานชนิดที่ 2 มีส่วนประกอบของธาตุคาร์บอน 0.45% และถ้าพิจารณาชิ้นงานทั้ง 4 ชนิดเมื่อผ่านการชุบแข็งเป็นเวลา 5 วินาที กับชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง จะพบว่าโครงสร้างไม่แตกต่างกันมากนัก และความแข็งของชิ้นงานเมื่อผ่านการชุบแข็งเป็นเวลา 5 วินาที พบว่าจะไม่แข็งมากนัก เมื่อเวลาชุบแข็งของชิ้นงานเพิ่มเป็น 15 วินาที พบว่าโครงสร้างทางโลหวิทยาของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปมาก คาดว่าโครงสร้างดังกล่าวอาจเป็นโครงสร้างของ Martensite และความแข็งของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าก่อนการชุบแข็งเป็นอันมาก เมื่อเวลาชุบแข็งเป็น 20 วินาที โครงสร้างของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไปมากและมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างของชิ้นงานเมื่อผ่านการชุบแข็งเป็นเวลา 15 วินาที คาดว่าโครงสร้างของชิ้นงานดังกล่าวควรจะเป็น Martensite ยกเว้นชิ้นงานชนิดที่ 4 เนื่องจากถ้าพิจารณาความแข็งของชิ้นงานทั้ง 4 ชนิด พบว่าเมื่อชิ้นงานผ่านการชุบแข็งเป็นเวลา 20 วินาที ชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเป็นอันมาก เช่นชิ้นงานชนิดที่ 1 มีความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 226 Hv เป็น 715.5 Hv ที่ระยะความลึกจากผิว 0.8 มิลลิเมตร ในกรณีของชิ้นงานชนิดที่ 2 ความแข็งจะเพิ่มจาก 189.6 Hv เป็น 666 Hv ที่ระยะความลึกจากผิว 0.8 มิลลิเมตร และกรณีของชิ้นงานชนิดที่ 3 ความแข็งจะเพิ่มจาก 220 Hv เป็น 780 Hv ที่ระยะความลึกเดียวกัน แต่สำหรับชิ้นงานชนิดที่ 4 ความแข็งของชิ้นงานหลังจากผ่านการชุบแข็งจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก จาก 163 Hv เป็น 470 Hv ที่ระดับความลึกจากผิว 0.8 มิลลิเมตร คาดว่าโครงสร้างของ

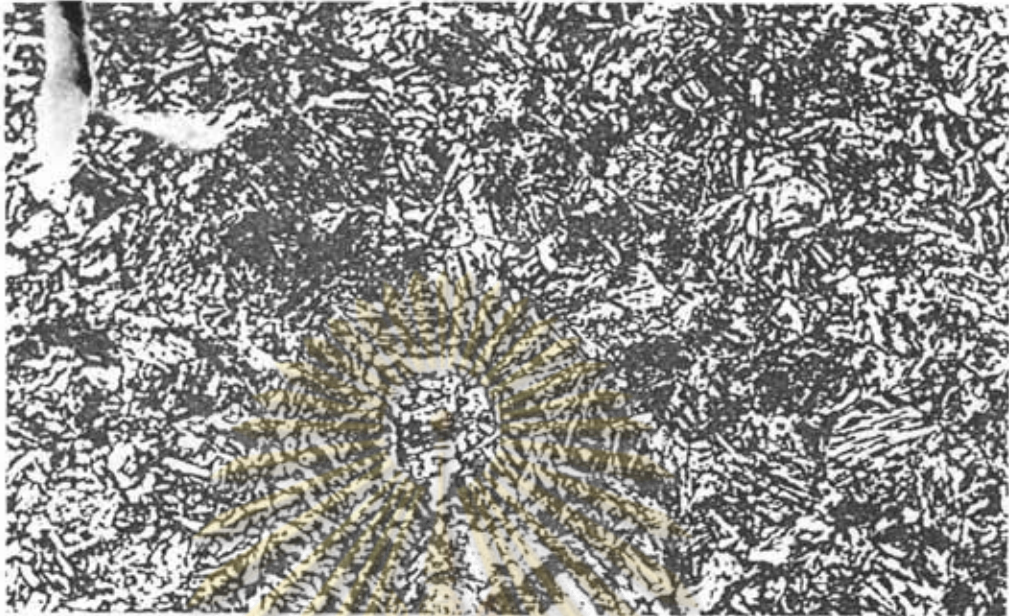
ชิ้นงานชนิดที่ 4 ไม่เป็น Martensite เหตุที่ชิ้นงานชนิดที่ 4 มีความแข็งหลังจากผ่าน
 ขบวนการชุบแข็งไม่มากเท่าชิ้นงานชนิดอื่น อาจมาจากชิ้นงานชนิดที่ 4 มีธาตุคาร์บอนที่เป็น
 ส่วนประกอบอยู่ค่อนข้างต่ำ



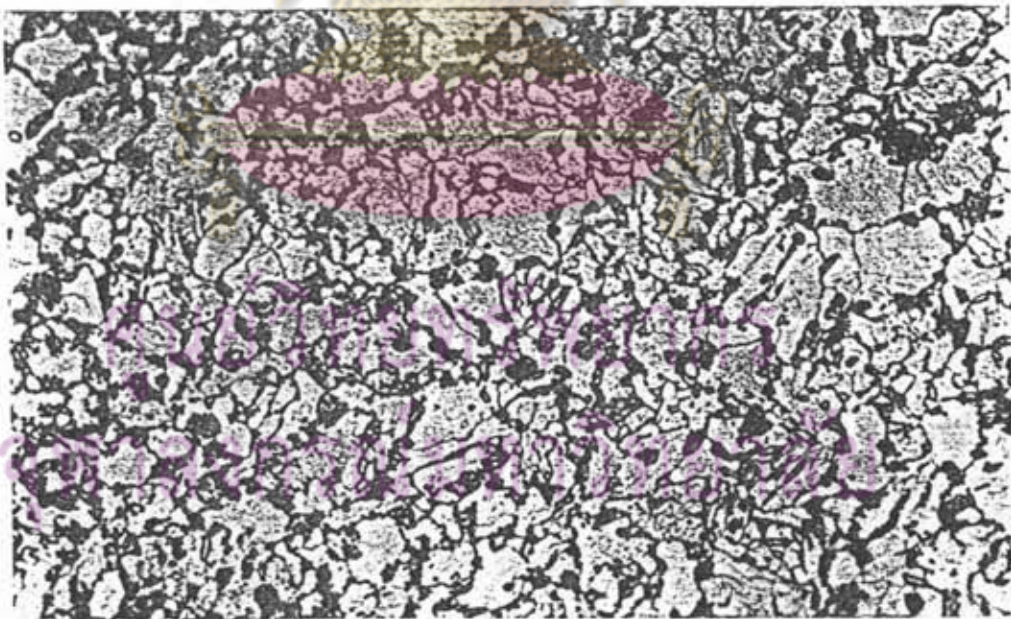
รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 1 ก่อนการชุบแข็ง x 200



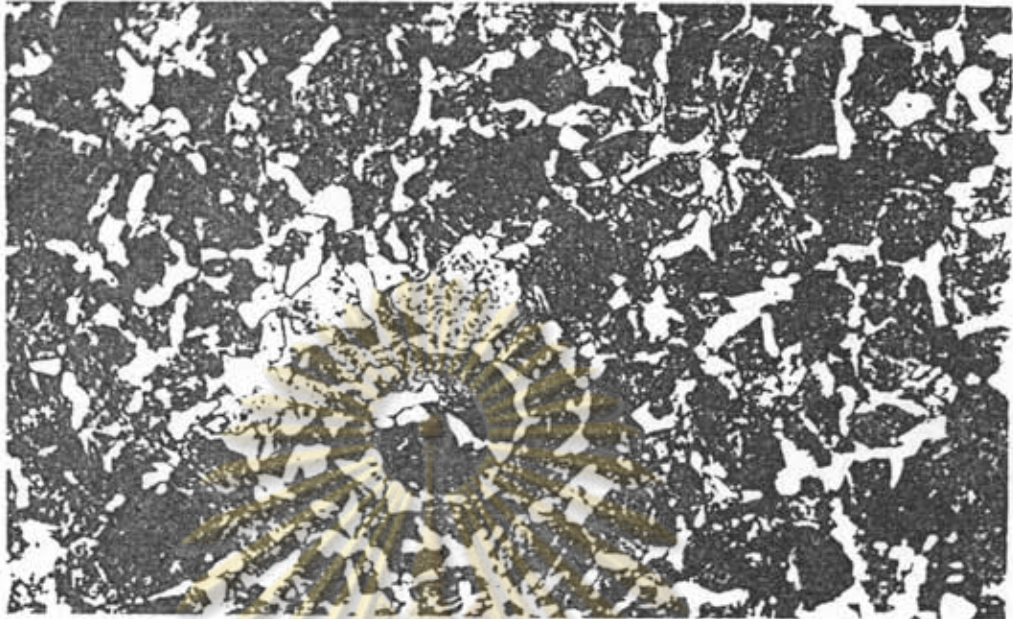
รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 2 ก่อนการชุบแข็ง x 200



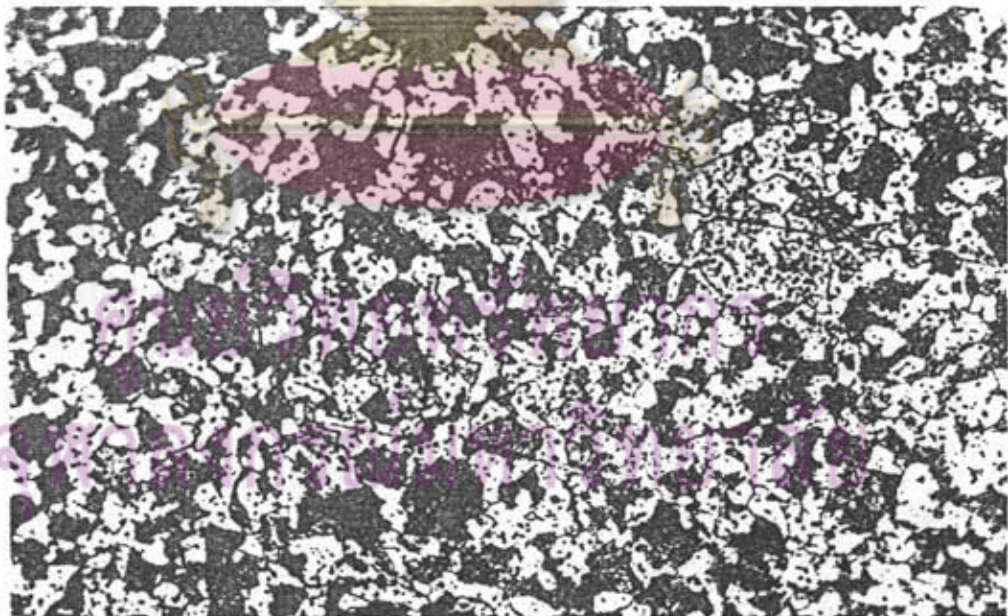
รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 3 ก่อนการชุบแข็ง x 200



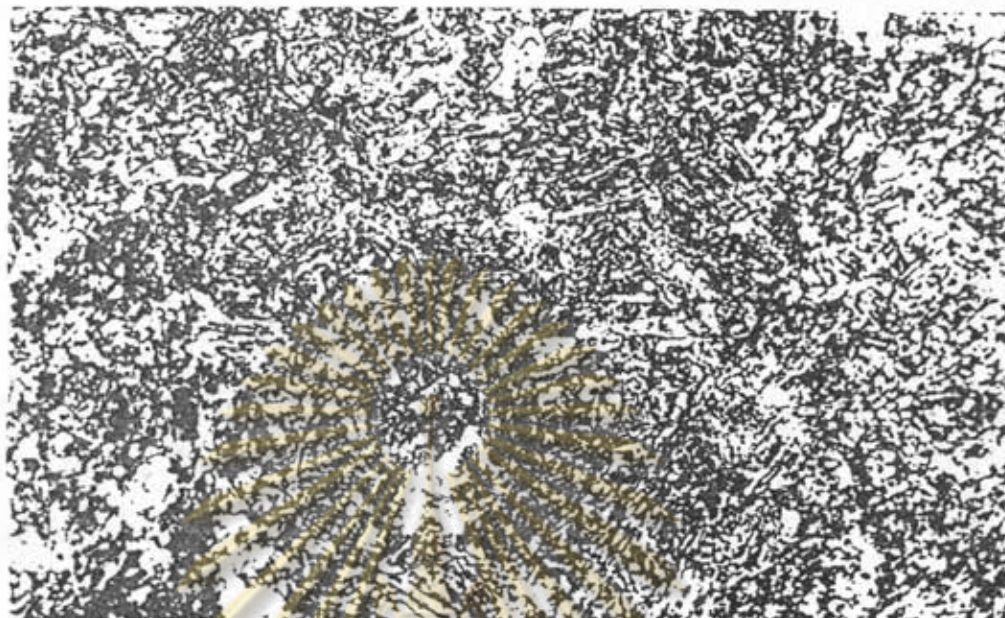
รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 4 ก่อนการชุบแข็ง x 200



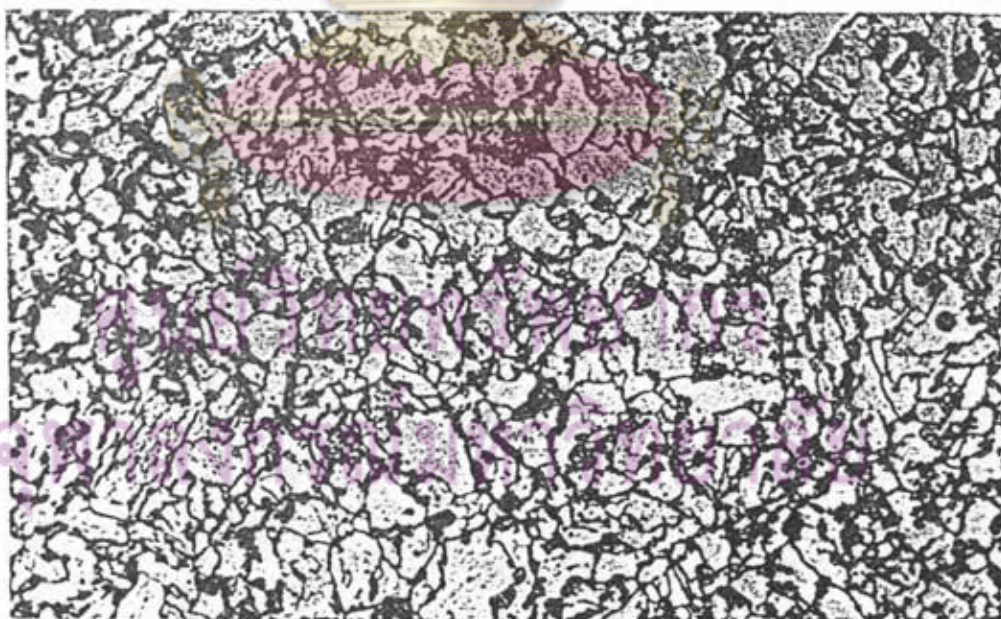
รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 1 ผ่านการชุบแข็ง 5 วินาที x 200



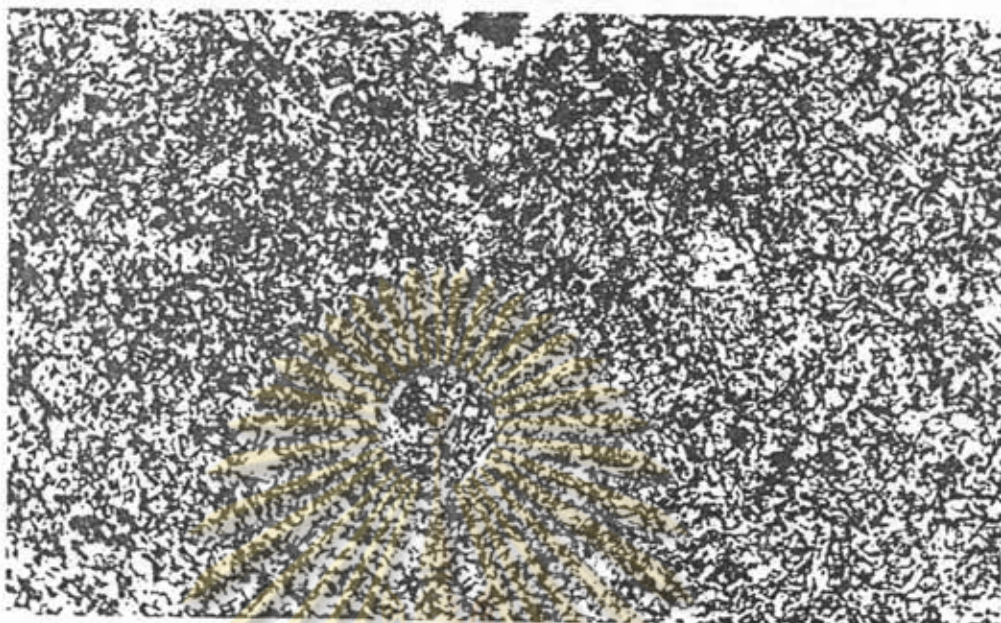
รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 2 ผ่านการชุบแข็ง 5 วินาที x 200



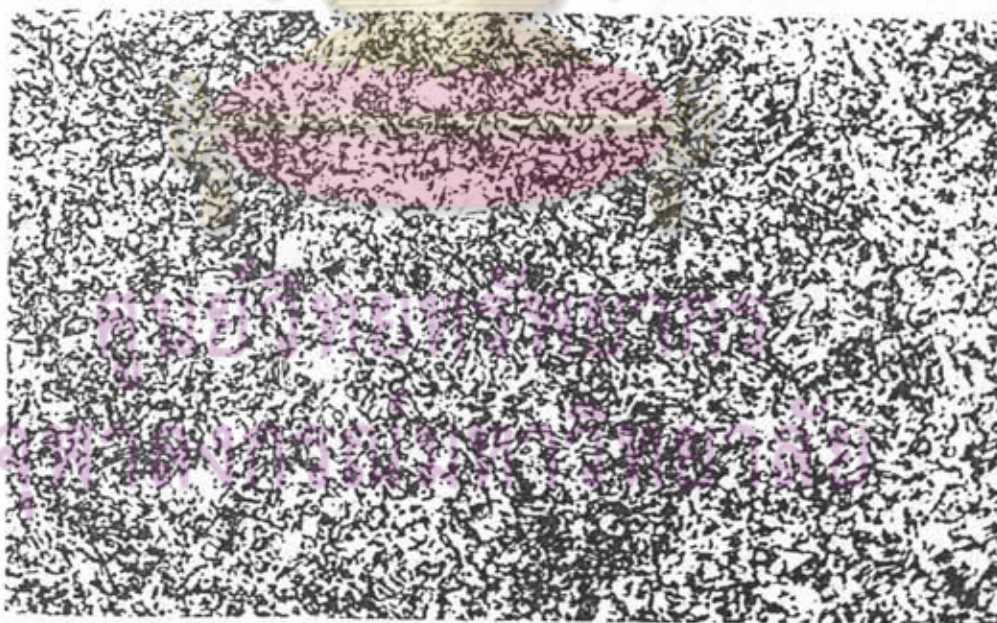
รูปที่ 4.11 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 3 ผ่านการชุบแข็ง 5 วินาที x 200



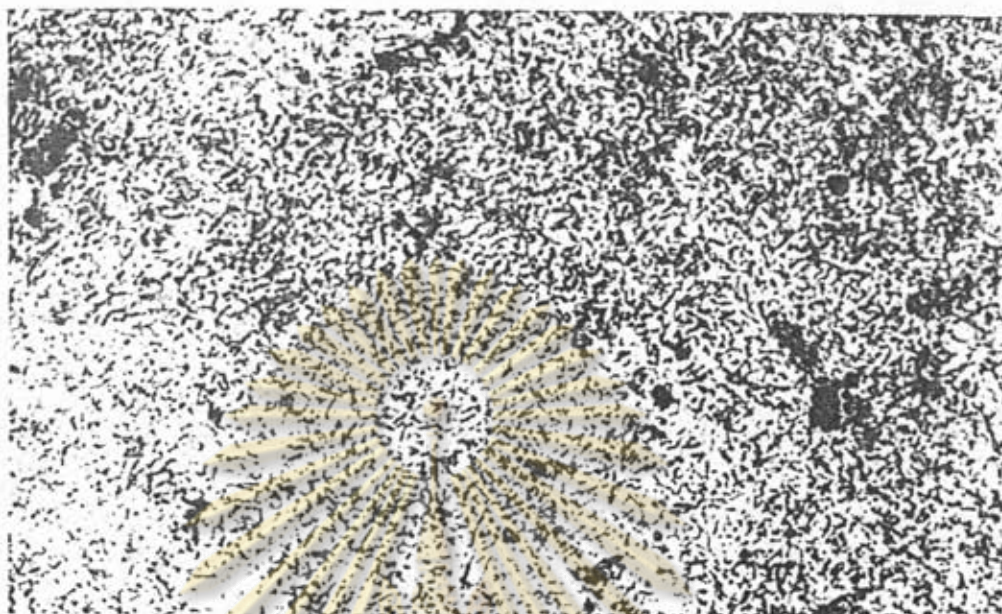
รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 4 ผ่านการชุบแข็ง 5 วินาที x 200



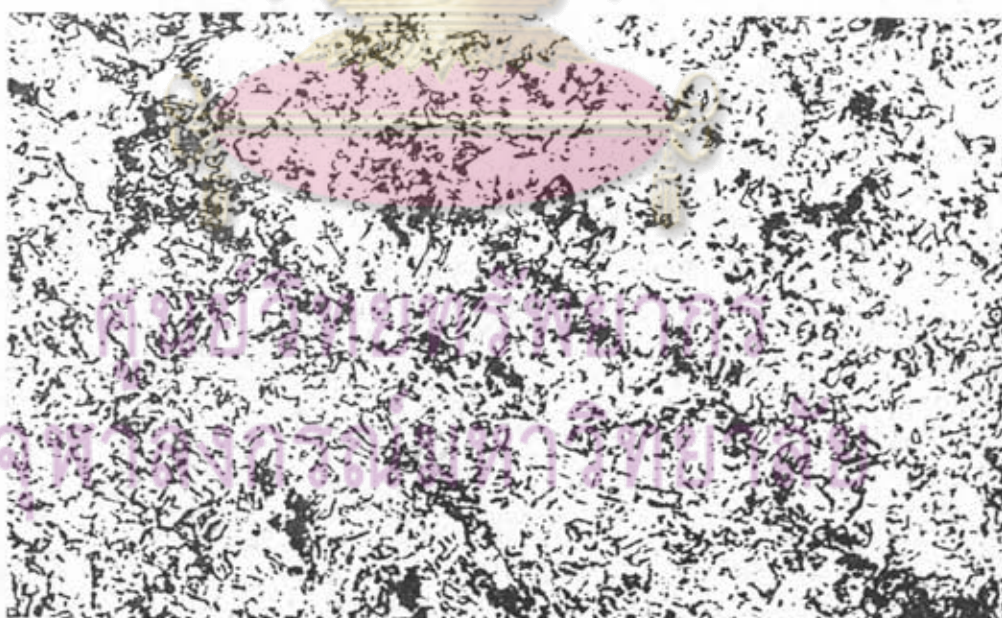
รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 1 ผ่านการชุบแข็ง 15 วินาที x 200



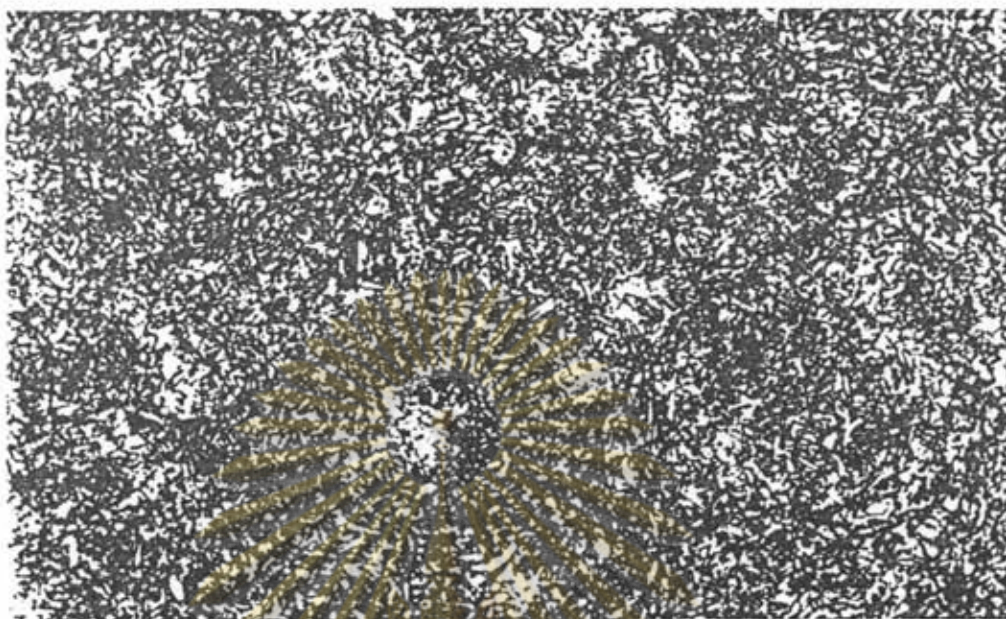
รูปที่ 4.14 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 2 ผ่านการชุบแข็ง 15 วินาที x 200



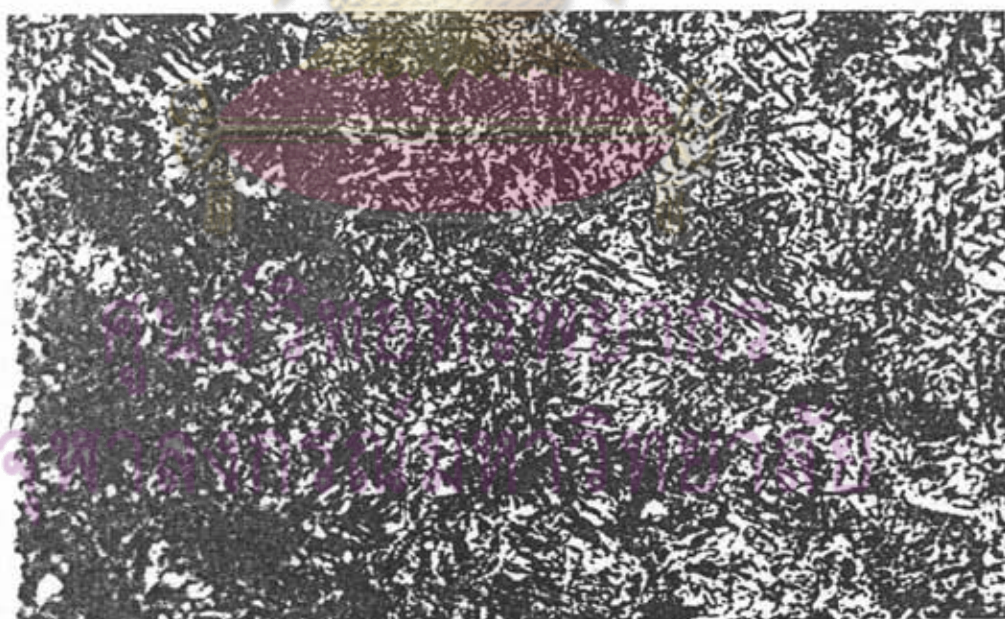
รูปที่ 4.15 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 3 ผ่านการชุบแข็ง 15 วินาที x 200



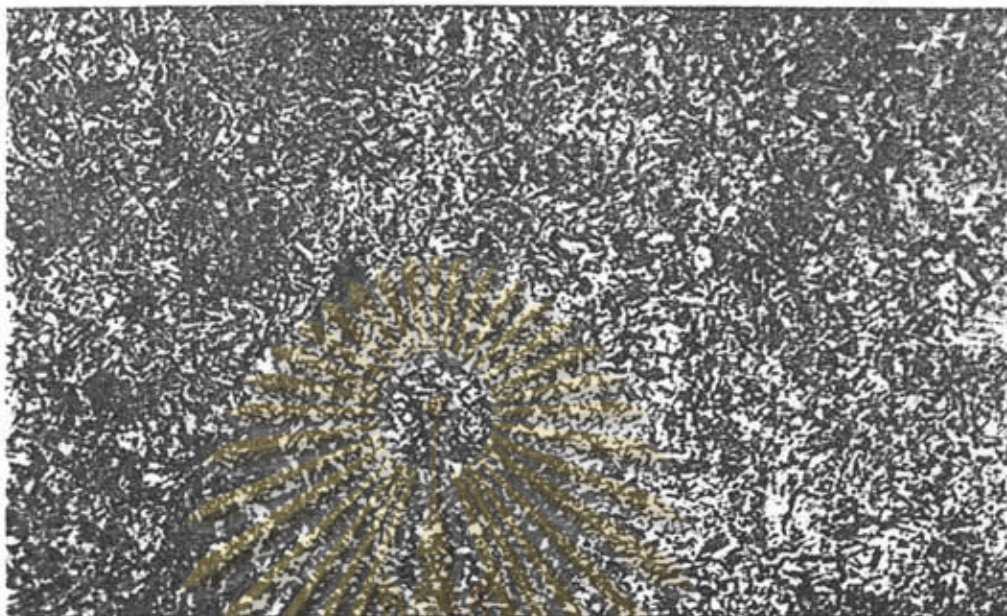
รูปที่ 4.16 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 4 ผ่านการชุบแข็ง 15 วินาที x 200



รูปที่ 4.17 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 1 ผ่านการชุบแข็ง 20 วินาที x 200



รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 2 ผ่านการชุบแข็ง 20 วินาที x 200



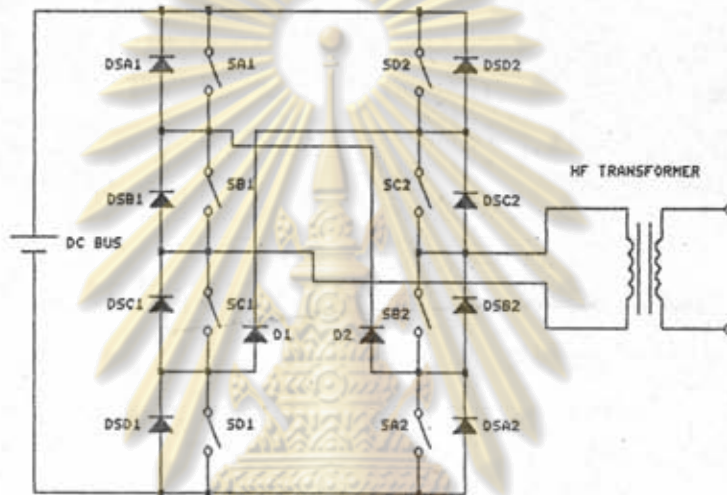
รูปที่ 4.19 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 3 ผ่านการชุบแข็ง 20 วินาที x 200



รูปที่ 4.20 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 4 ผ่านการชุบแข็ง 20 วินาที x 200

4.2 การทดสอบทางไฟฟ้า

การทดสอบทางไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนแบบเห็นเขี้ยวที่สร้างขึ้น จะพิจารณาการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ โดยจะพยายามบันทึกรูปคลื่นแรงดันคร่อมมอสเฟตกำลังแต่ละตัว กระแสที่ผ่านมอสเฟตกำลัง รวมทั้งความสัมพันธ์กระแสอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะและแรงดันแบบสามสถานะที่อินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้จะพิจารณาผลของการเปลี่ยนความถี่การทำงานของวงจรที่ผลต่อระบบ เช่น กำลังที่ชิ้นงานได้รับ กำลังที่สูญเสียขณะไร้โหลด แรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน เป็นต้น

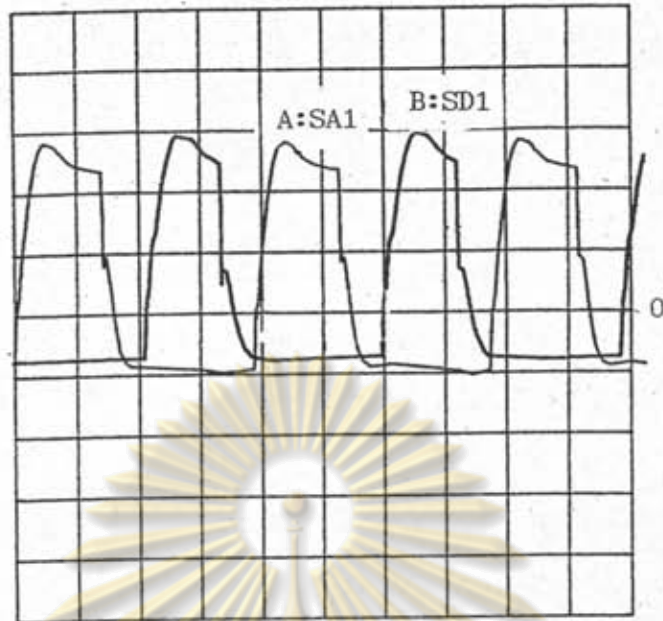


รูปที่ 4.21 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

4.2.1 รูปคลื่นสัญญาณเขี้ยว

จากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ ที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อนแบบเห็นเขี้ยว มี 2 ชุด วงจรเขี้ยวแบบแยกโดดจึงต้องมี 2 ชุดด้วยเช่นกัน ในที่นี้จะแสดงความสัมพันธ์ของวงจรเขี้ยวเกทของมอสเฟตกำลังเพียงชุดเดียว สัญญาณเขี้ยวเกทมอสเฟตกำลังทั้ง 8 สัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึง รูปที่ 4.5

จากรูปสัญญาณเขี้ยวเกทของมอสเฟตกำลัง SA1 , SA2 , SD1 และ SD2 จะมีค่าวัฏจักรงานประมาณ 35% ของคาบเวลา และสัญญาณเขี้ยวเกทของมอสเฟตกำลัง SB1 , SB2, SC1 และ SC2 จะมีค่าประมาณ 55% ของวัฏจักรงานซึ่งใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ และถ้าพิจารณารูปคลื่นสัญญาณเขี้ยวเกทของมอสเฟตกำลังทั้ง 8 ตัว จะพบว่าสัญญาณเขี้ยวเกททั้ง 8 จะมีรูปร่างใกล้เคียงกับสัญญาณที่ได้จากการซิมูเลตวงจรเขี้ยวเกทใน หัวข้อที่ 3.5.2

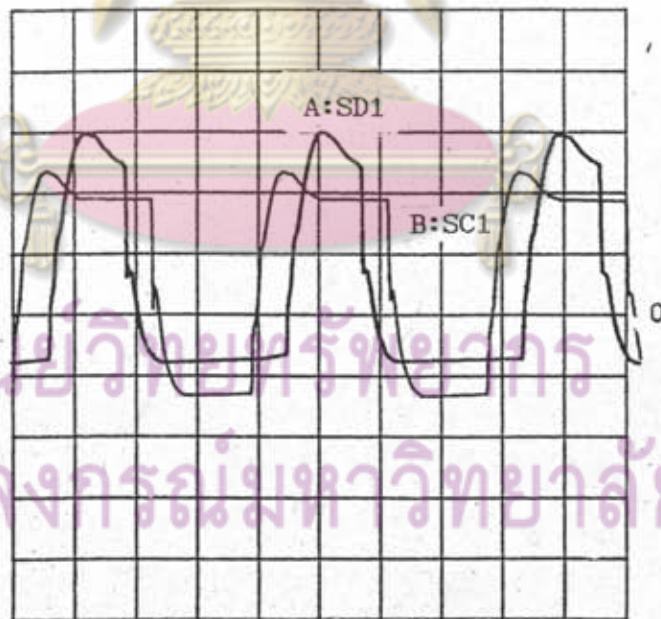


A: 5V/div

T: 2 μ s/div

B: 5V/div

รูปที่ 4.22 สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลัง SA1 และ SD1



A: 5V/div

T: 2 μ s/div

B: 5V/div

รูปที่ 4.23 สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลัง SD1 และ SC1

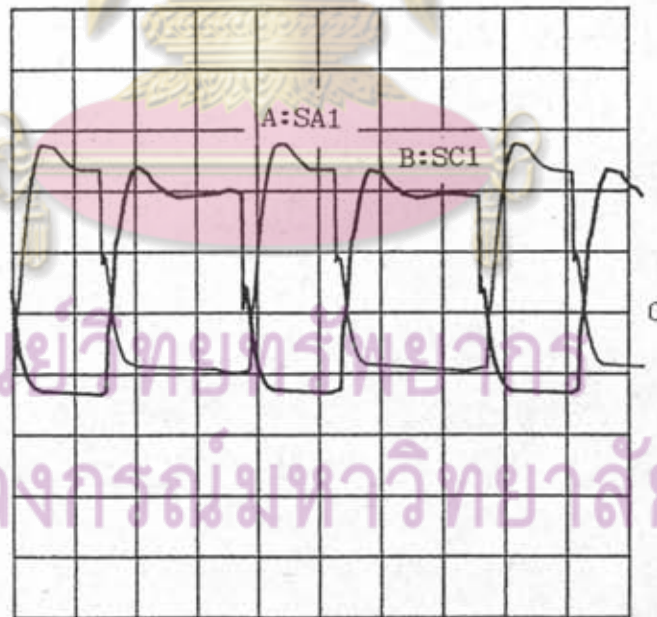


A: 5V/div

T: 2us/div

B: 5V/div

รูปที่ 4.24 สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลัง SB1 และ SC1



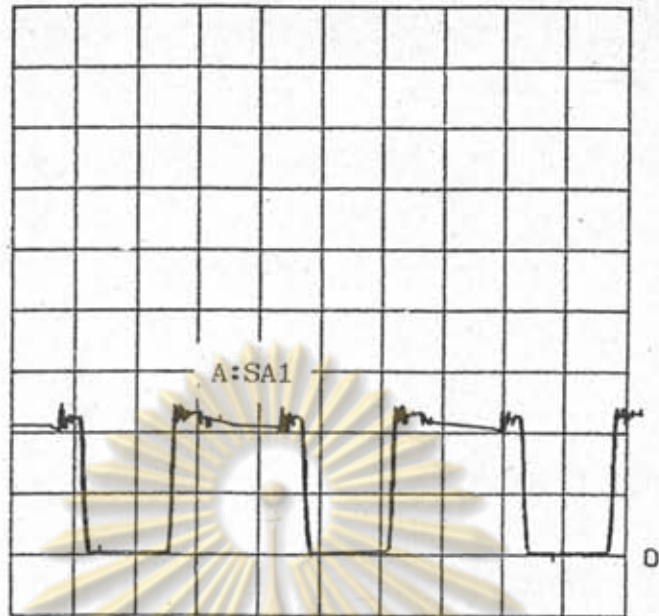
A: 5V/div

T: 2us/div

B: 5V/div

รูปที่ 4.25 สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลัง SA1 และ SC1

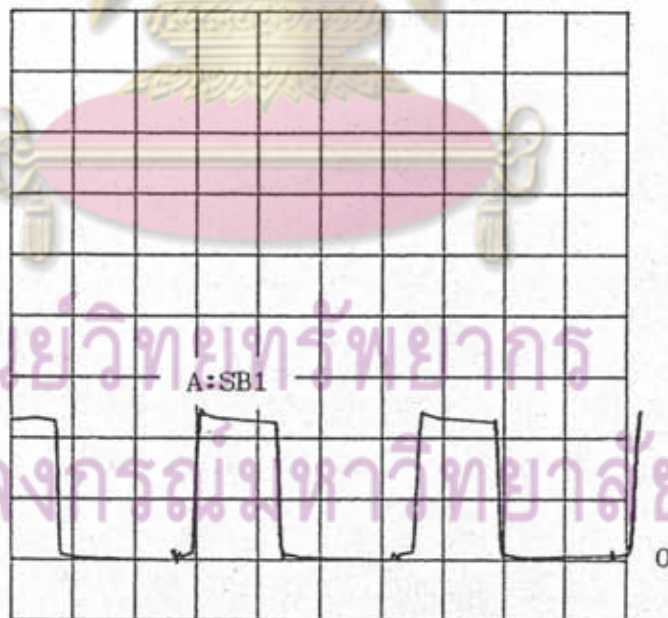
ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



A: 100V/div T: 2 μ s/div

B:

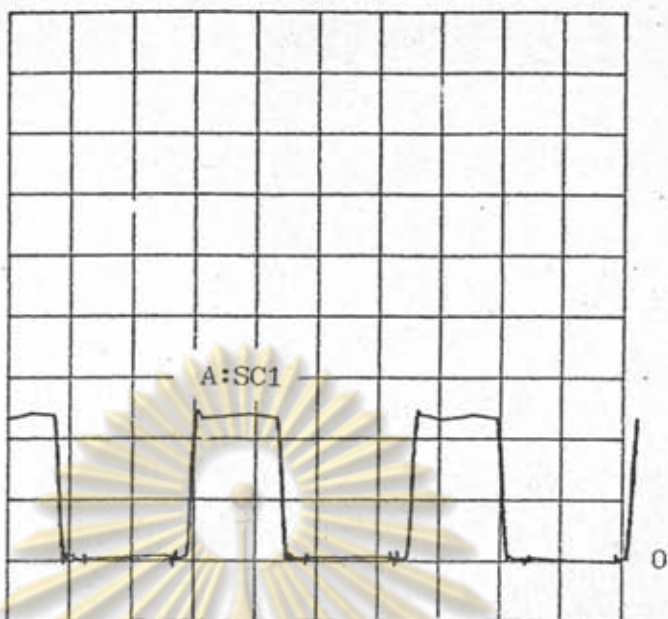
รูปที่ 4.26 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SA1



A: 100V/div T: 2 μ s/div

B:

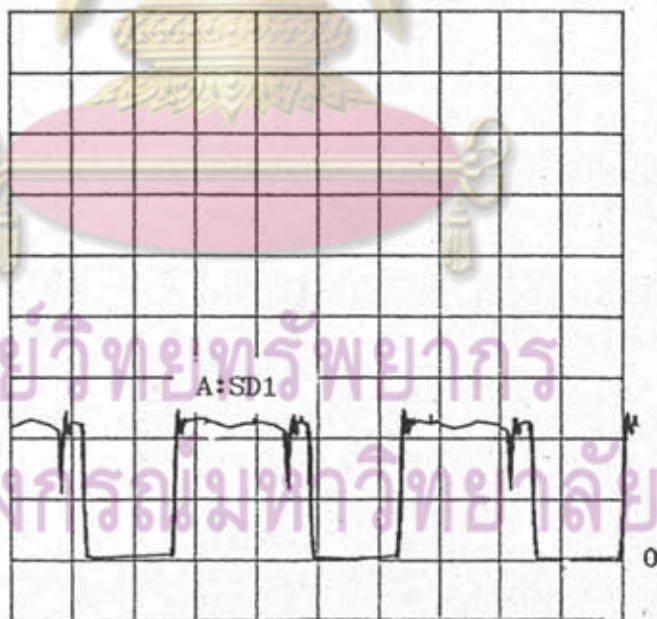
รูปที่ 4.27 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SB1



A: 100V/div T: 2us/div

B:

รูปที่ 4.28 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SC1

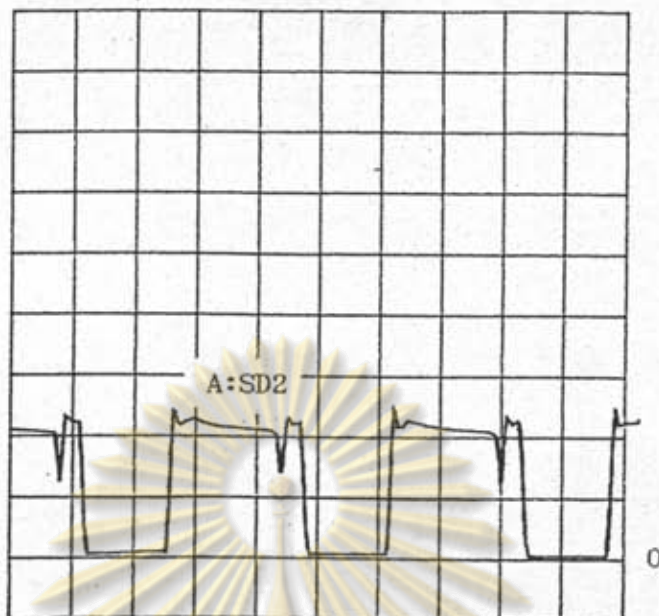


A: 100V/div T: 2us/div

B:

รูปที่ 4.29 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SD1

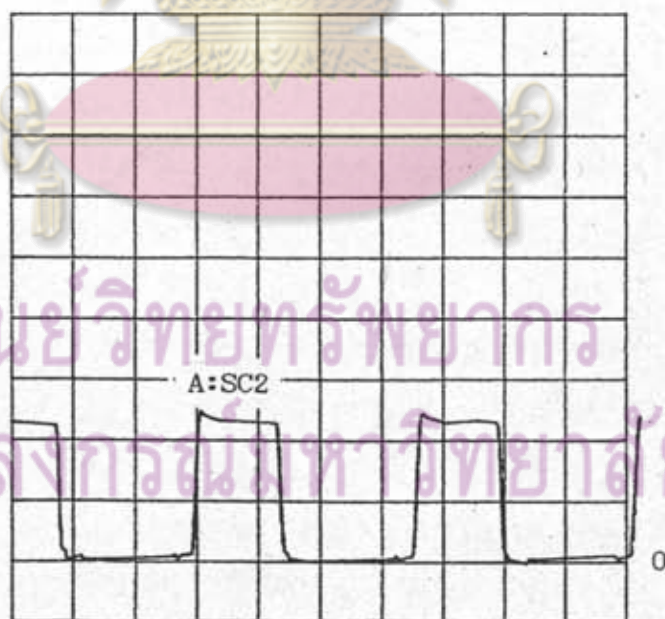
ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



A: 100V/div T: 2us/div

B:

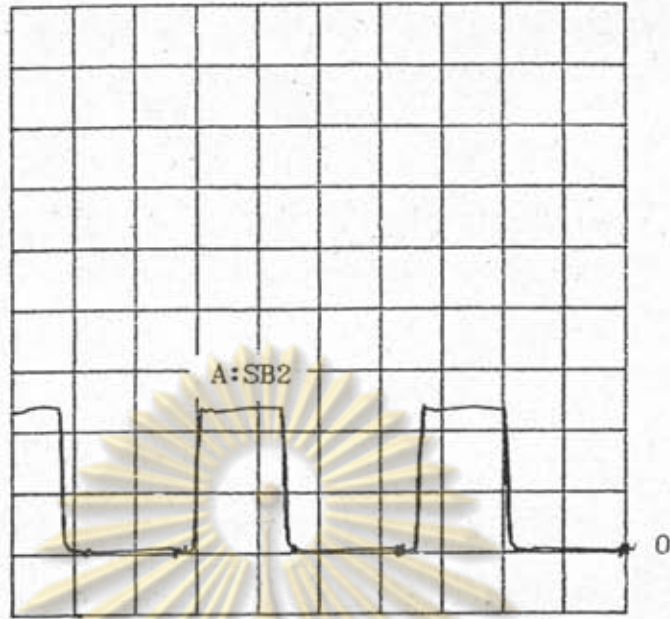
รูปที่ 4.30 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SD2



A: 100V/div T: 2us/div

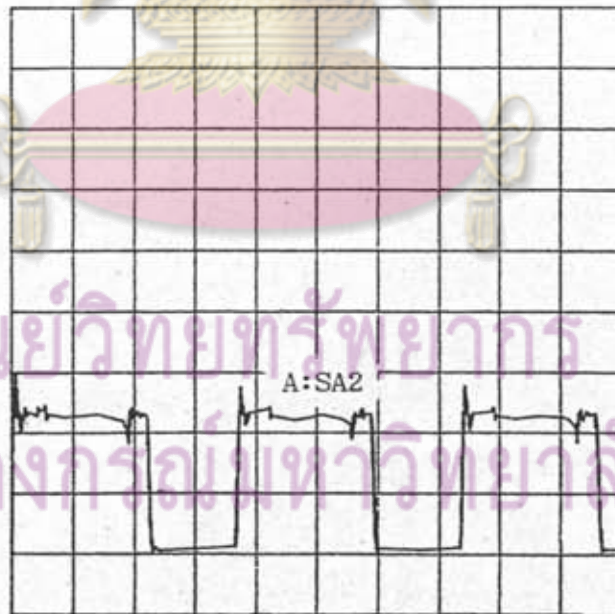
B:

รูปที่ 4.31 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SC2



A: 100V/div T: 2us/div
B:

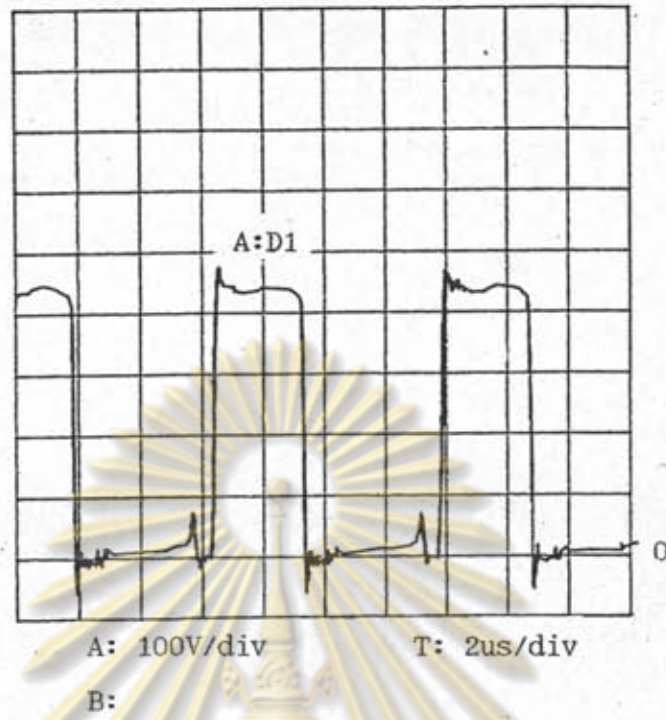
รูปที่ 4.32 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SB2



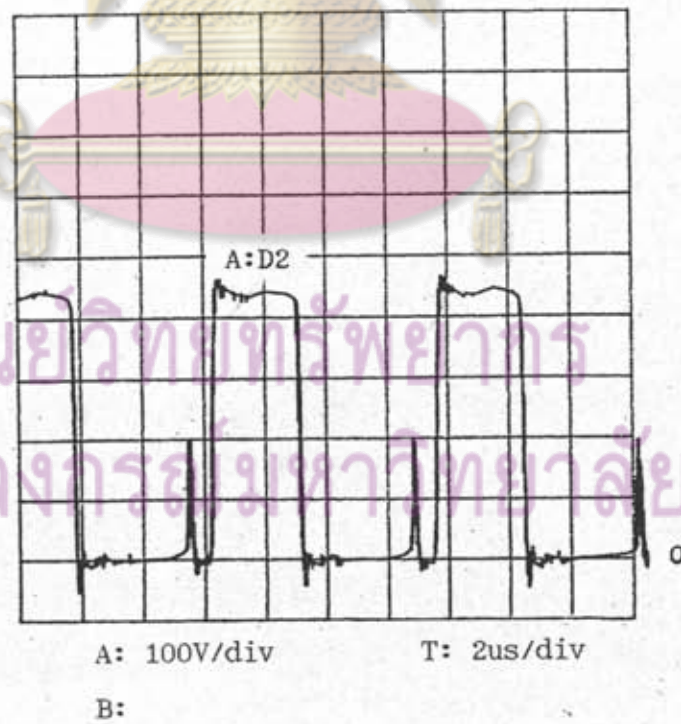
A: 100V/div T: 2us/div
B:

รูปที่ 4.33 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SA2

ศูนย์วิทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.34 แรงดันคร่อมไดโอดระบายกระแสไหล D1

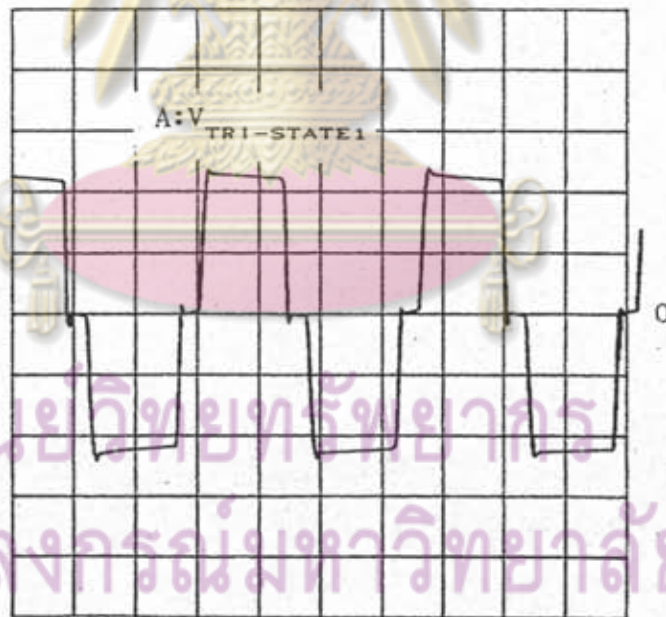


รูปที่ 4.35 แรงดันคร่อมไดโอดระบายกระแสไหล D2

4.2.2 รูปคลื่นแรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง

เนื่องจาก การวัดแรงดันคร่อมมอสเฟตกำลังที่แรงดันการทำงานของวงจรถวาย
อาจรบกวนการทำงานของวงจรรินเวอเตอร์แบบสามสถานะได้ จึงต้องลดแรงดันแหล่งจ่าย
ไฟตรงของระบบลงให้เหลือประมาณ 400 โวลต์ จึงสามารถวัดแรงดันคร่อมมอสเฟตกำลังทั้ง
8 ตัว และแรงดันคร่อมไดโอดระบายกระแสไหลกลับได้ ดังรูปที่ 4.26 ถึง รูปที่ 4.35

จากรูปสัญญาณคร่อมมอสเฟตกำลังทั้ง 8 สัญญาณ จะมีลักษณะใกล้เคียงกับ
ผลการซิมูเลตที่ได้ในหัวข้อที่ 3.2.2 แต่ถ้าพิจารณาผลการวัดที่ได้ พบว่าแรงดันคร่อมมอสเฟต
กำลังทั้ง 8 สัญญาณ จะมีแรงดันสไปก์สูงพอสมควรเนื่องจากความเหนี่ยวนำสมมูลจากสายตัว
นำที่ใช้เชื่อมต่อมอสเฟตกำลังแต่ละตัว ในวงจรรินเวอเตอร์แบบสามสถานะที่ออกแบบมีวงจรถวาย
สลับเบอร์แรงดันต่อขานานมอสเฟตกำลังแต่ละตัวอยู่แล้ว มิฉะนั้นแรงดันสไปก์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูง
กว่าแรงดันที่แสดงในรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.33

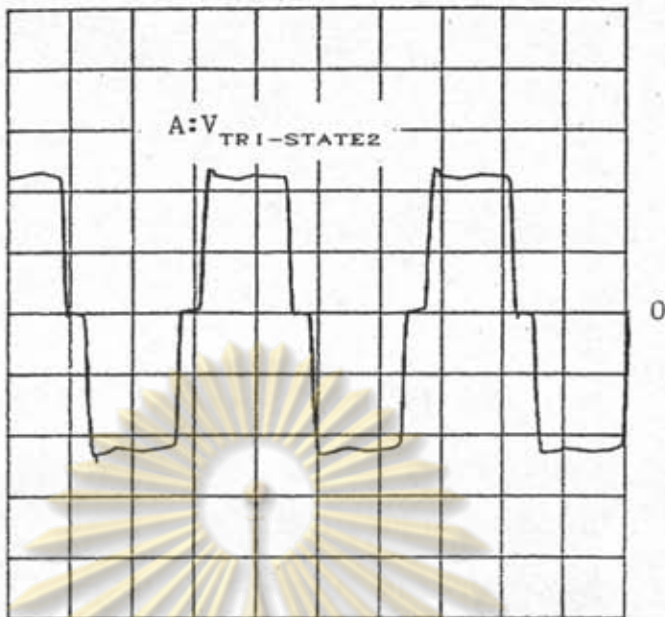


A: 200V/div

T: 2us/div

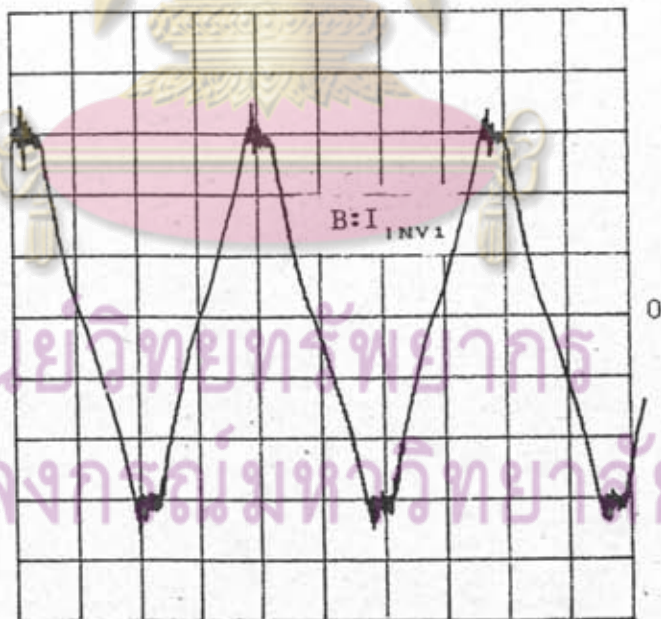
B:

รูปที่ 4.36 แรงดันแบบสามสถานะของอินเวอเตอร์ชุดที่1



A: 200V/div T: 2us/div
 B:

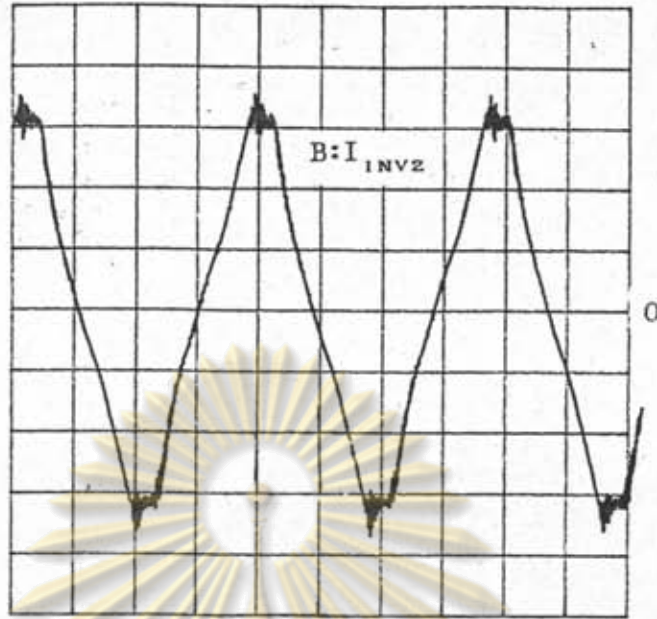
รูปที่ 4.37 แรงดันแบบสามสถานะของอินเวอร์เตอร์ชุดที่2



A: T: 2us/div
 B: 10A/div

รูปที่ 4.38 กระแสของอินเวอร์เตอร์ชุดที่1

ศูนย์วิทยศาสตร์พยาบาล
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



A: T: 2us/div
 B: 10A/div

รูปที่ 4.39 กระแสของอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 2

4.2.3 รูปคลื่นแรงดันสามสถานะ และ กระแสอินเวอร์เตอร์

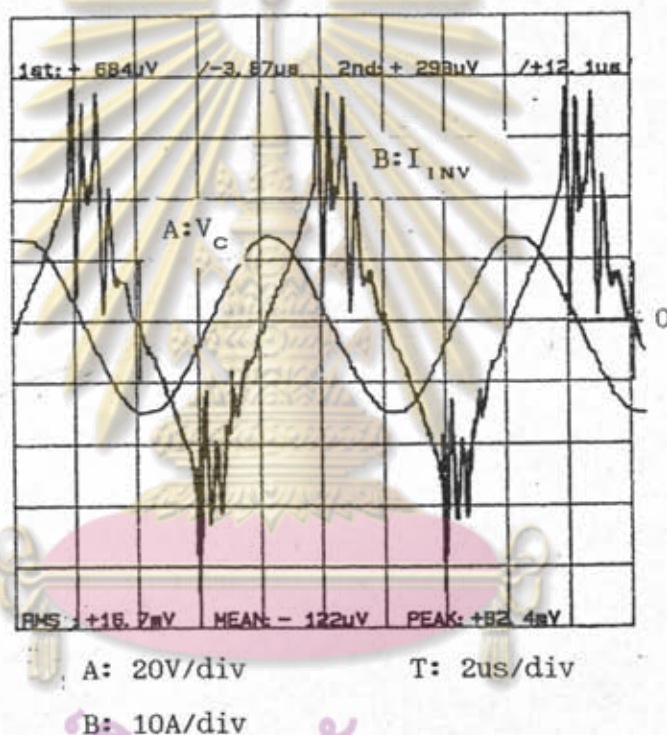
จากวงจรเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ จะมีวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะสองชุด ในที่นี้จะแสดงรูปคลื่นแรงดันแบบสามสถานะของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุด ดังรูปที่ 4.36 และ รูปที่ 4.37 และสามารถวัดกระแสที่อินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุดได้ดังรูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 จากรูปแรงดันแบบสามสถานะของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุดจะมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก และรูปร่างจะใกล้เคียงกับผลการซิมูเลตในหัวข้อที่ 3.2.2 ด้วย เนื่องจากแรงดันแบบสามสถานะของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุดมีขนาดใกล้เคียงกัน ทำให้การแบ่งกระแสอินเวอร์เตอร์ของระบบทั้งสองชุดค่อนข้างสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4.38 และ รูปที่ 4.39

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.4 รูปคลื่นกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด

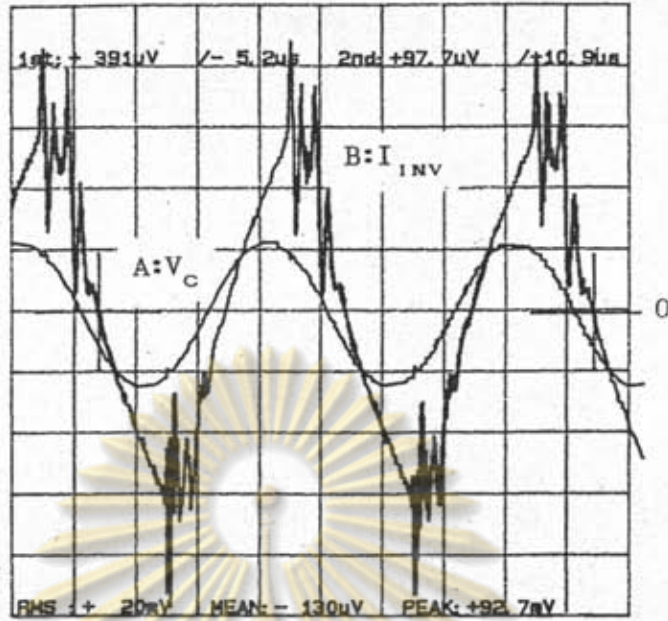
การพิจารณารูปคลื่นกระแสผ่านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง ไม่สามารถทำได้โดยตรง จึงต้องพิจารณาจากกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงแทน โดยจะพิจารณาว่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าใหญ่มาก จนสามารถละเลยกระแสทำแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูงได้ ดังนั้นกระแสลุดปฐมภูมิจะมีรูปร่างเหมือนกับกระแส

ปฏิกิริยา เพียงแต่มีขนาดเป็น 9 เท่า เนื่องจากอัตราการแปลงของหม้อแปลงความถี่สูง ในที่นี้ จะวัดรูปคลื่นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง และแรงดันที่ขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเพื่อประมาณกำลังที่ขดลวดให้ความร้อน ที่ความถี่ต่างๆ และภาวะโหลดของวงจรเป็น ภาวะไร้โหลด ภาวะมีโหลด และเมื่อโหลดถึงจุดกู่รี โดยรูปคลื่นความสัมพันธ์ของกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงหรือกระแสของอินเวอร์เตอร์ และแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 4.40 ถึง รูปที่ 4.57 และโหลดที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นเหล็กผสมคาร์บอน 0.45 % ลักษณะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 เซนติเมตร



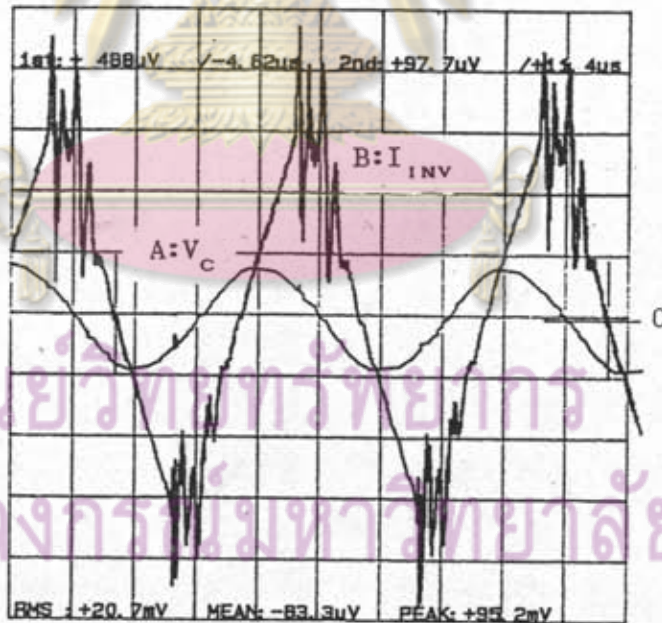
รูปที่ 4.40 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 125 กิโลเฮิรตซ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



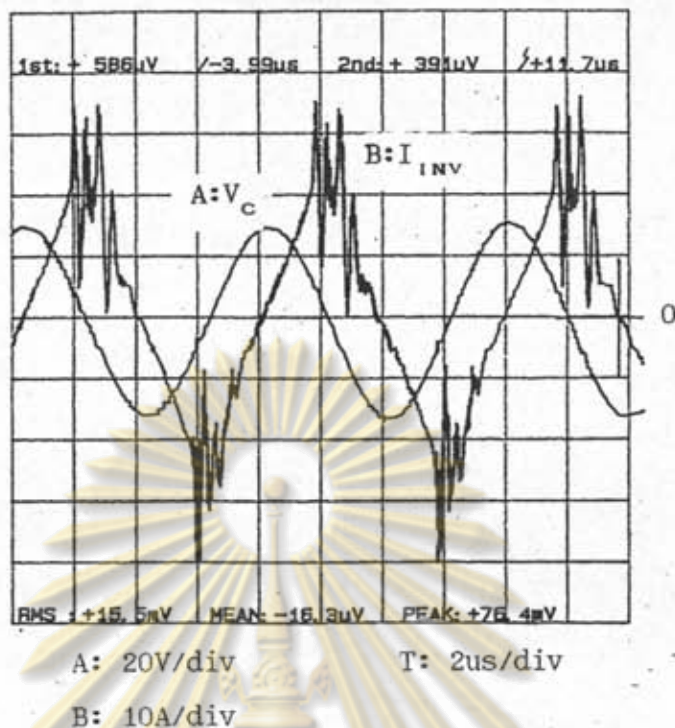
A: 20V/div T: 2us/div
 B: 10A/div

รูปที่ 4.41 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 125 กิโลเฮิรตซ์

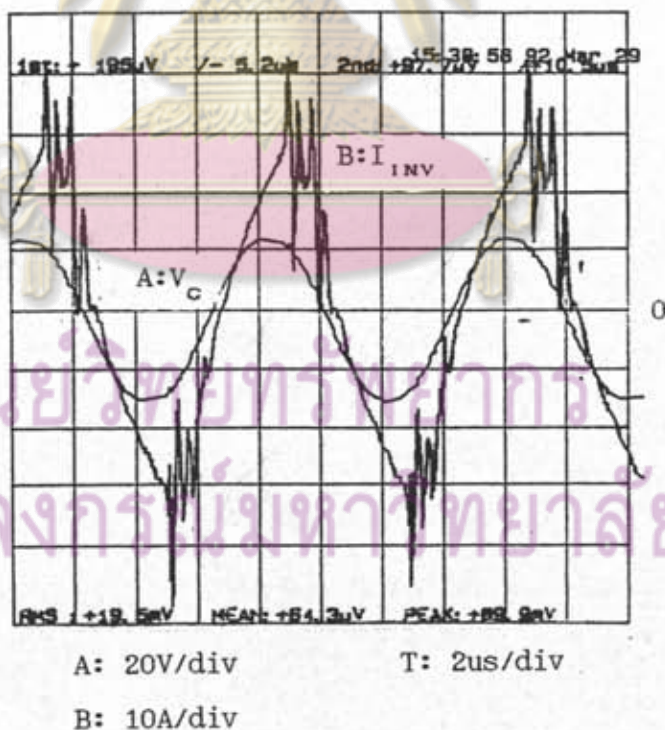


A: 20V/div T: 2us/div
 B: 10A/div

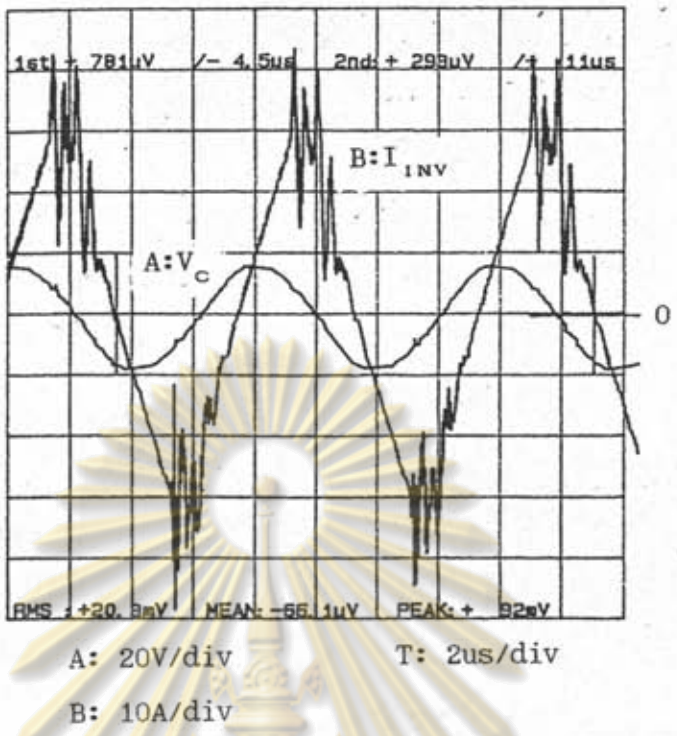
รูปที่ 4.42 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 125 กิโลเฮิรตซ์



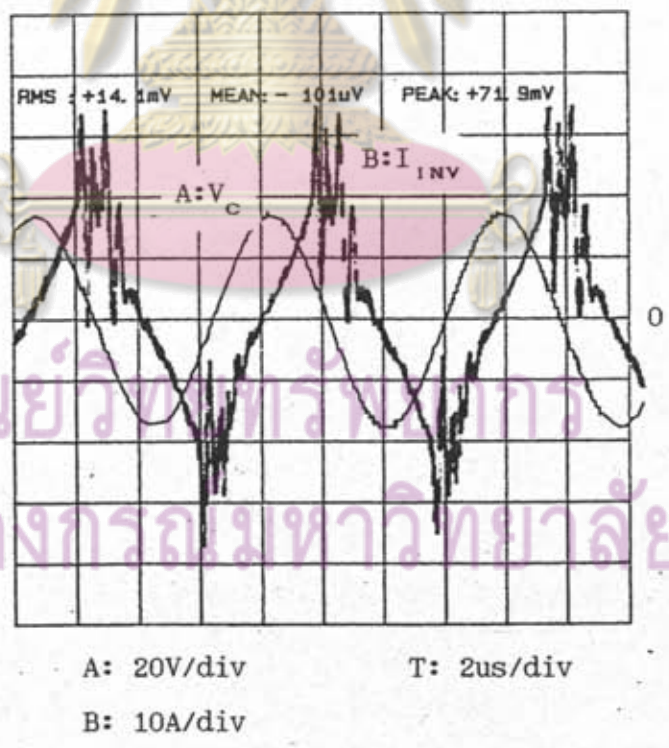
รูปที่ 4.43 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 128 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.44 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 128 กิโลเฮิรตซ์

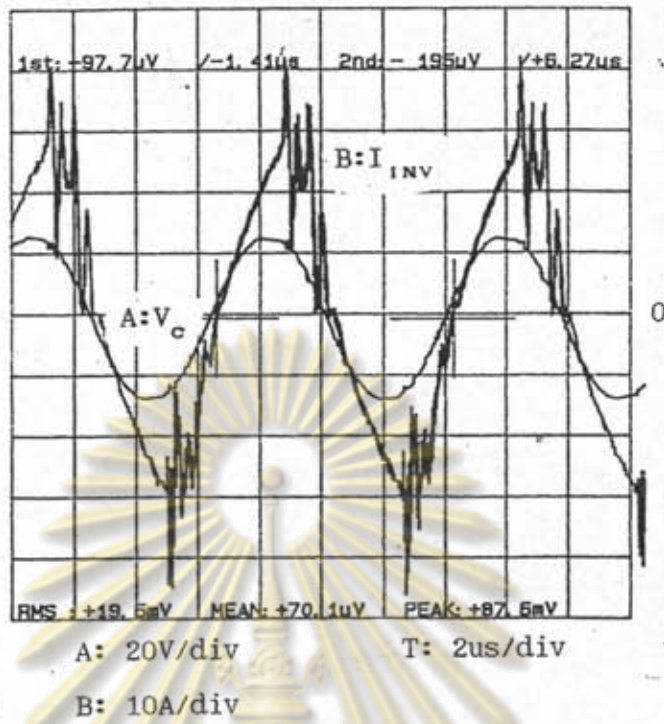


รูปที่ 4.45 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร่อนแดง ความถี่ 128 กิโลเฮิรตซ์

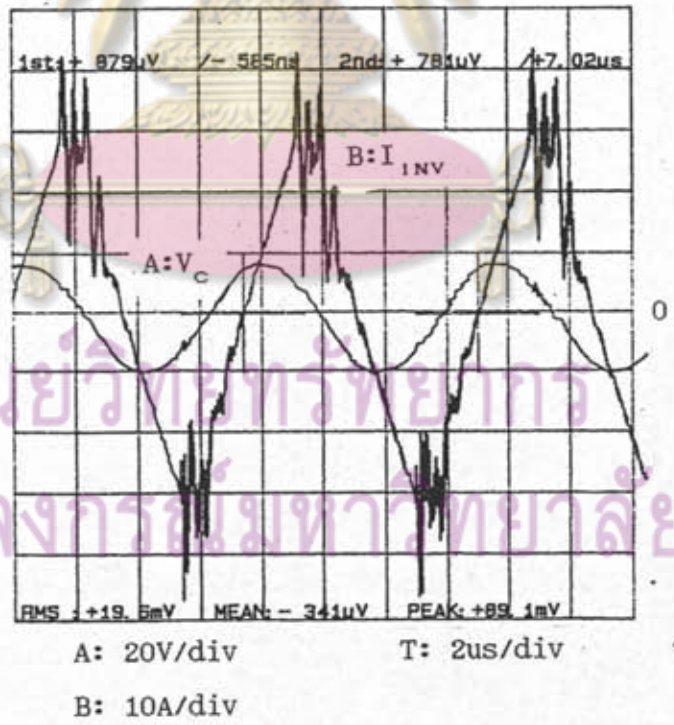


รูปที่ 4.46 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะไว้โหลด ความถี่ 131.6 กิโลเฮิรตซ์

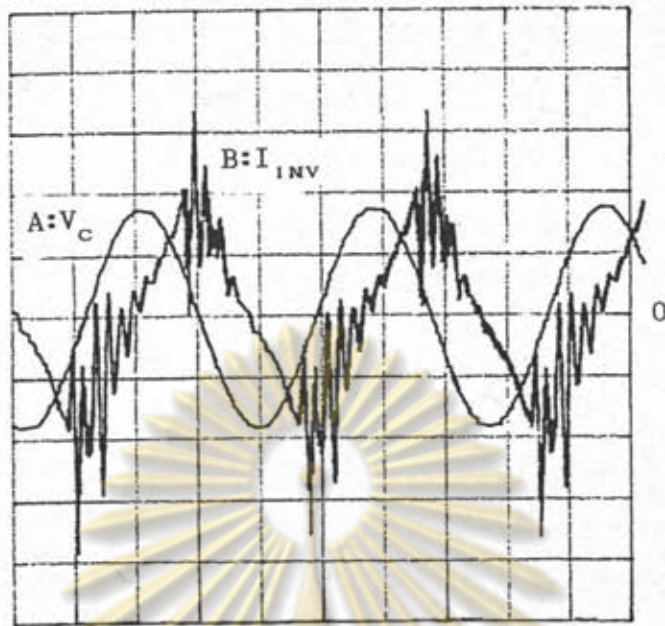
ศูนย์วิจัยการพลังงาน
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.47 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน ที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 131.6 กิโลเฮิร์ตซ์



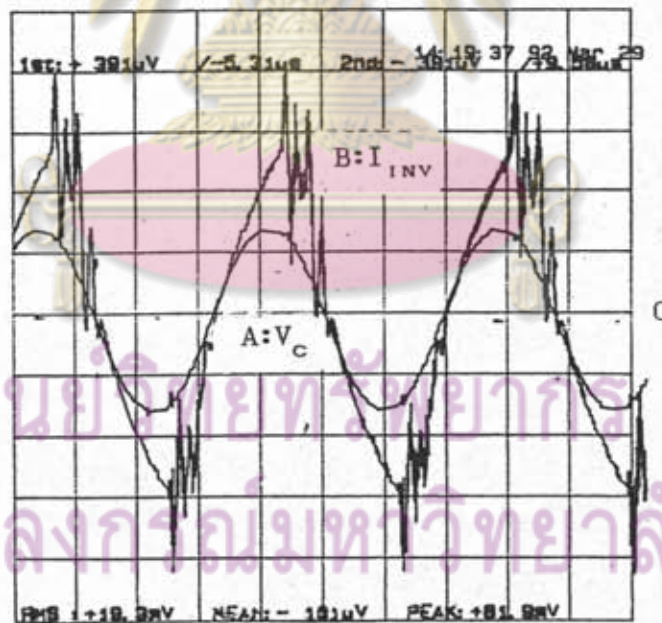
รูปที่ 4.48 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน ที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 131.6 กิโลเฮิร์ตซ์



A: 20V/div T: 2us/div

B: 10A/div

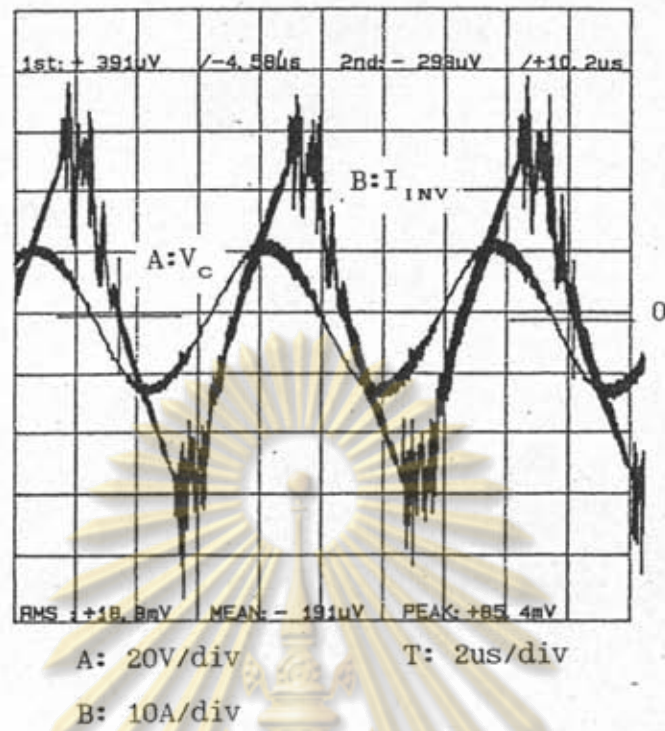
รูปที่ 4.49 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 135 กิโลเฮิร์ตซ์



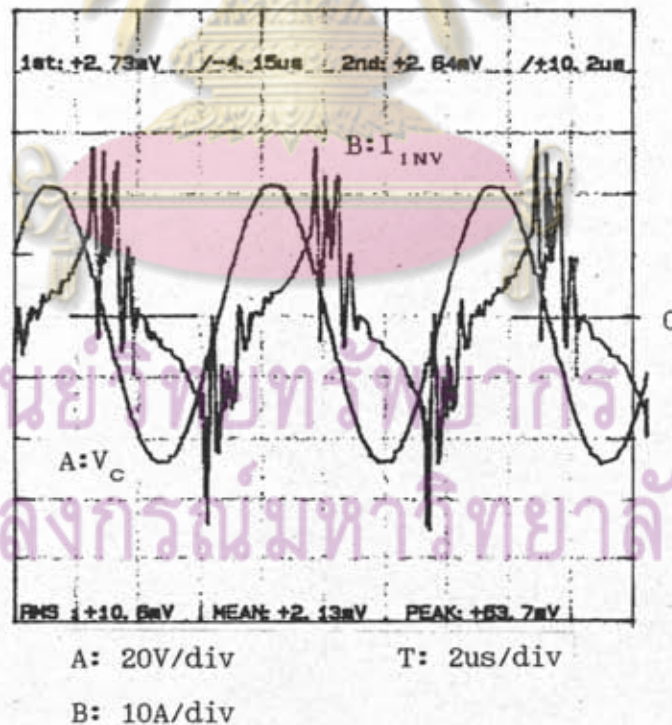
A: 20V/div T: 2us/div

B: 10A/div

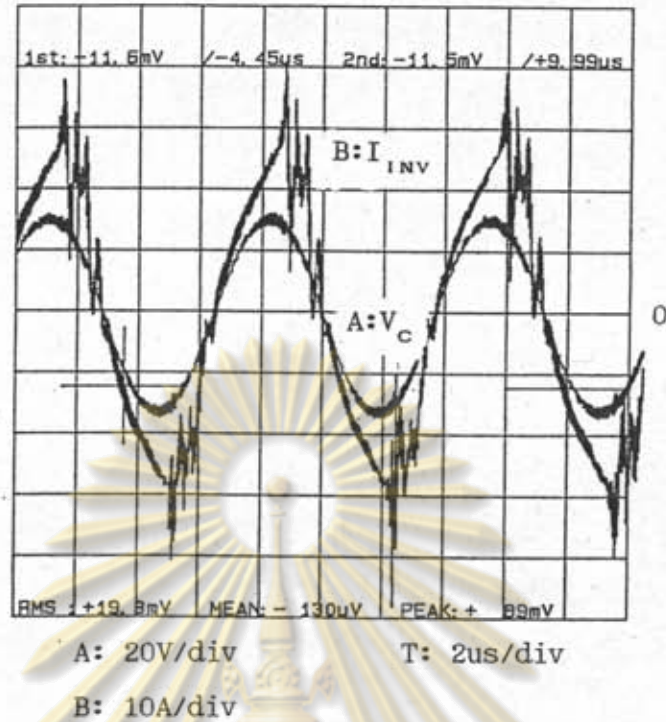
รูปที่ 4.50 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 135 กิโลเฮิร์ตซ์



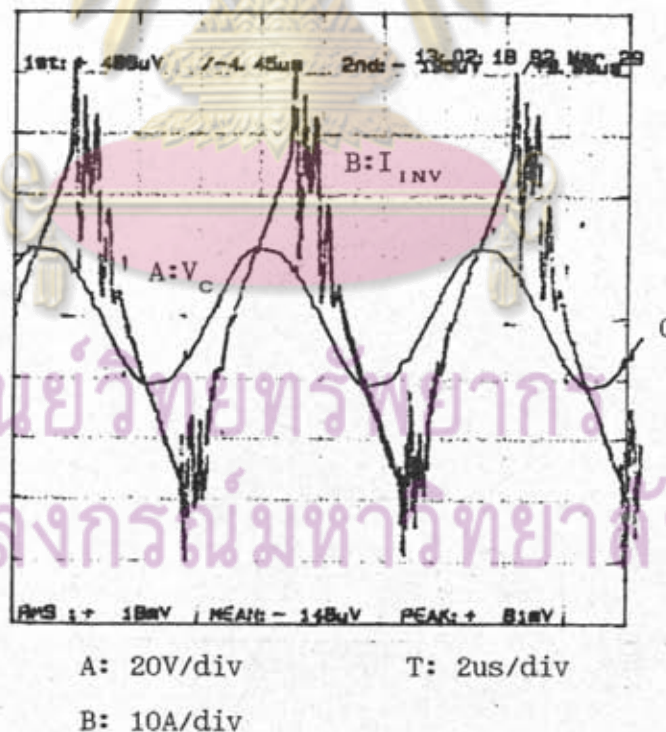
รูปที่ 4.51 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 135 กิโลเฮิรตซ์



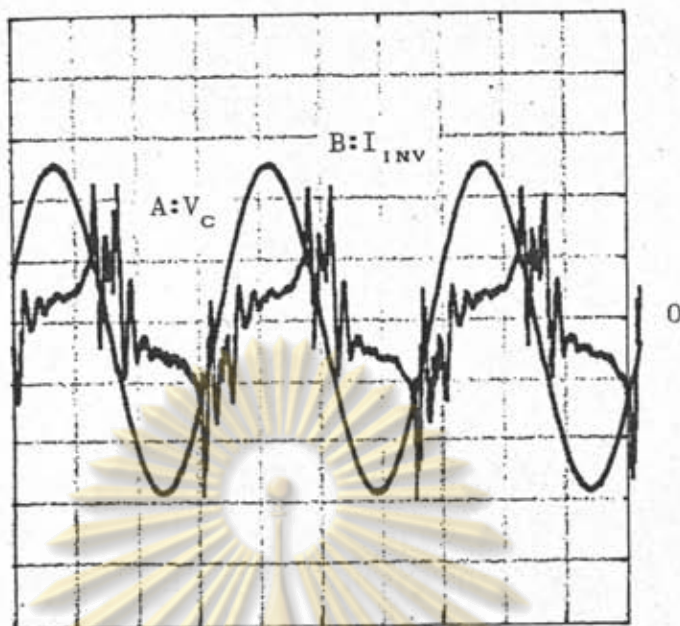
รูปที่ 4.52 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะไว้โหลด ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.53 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์



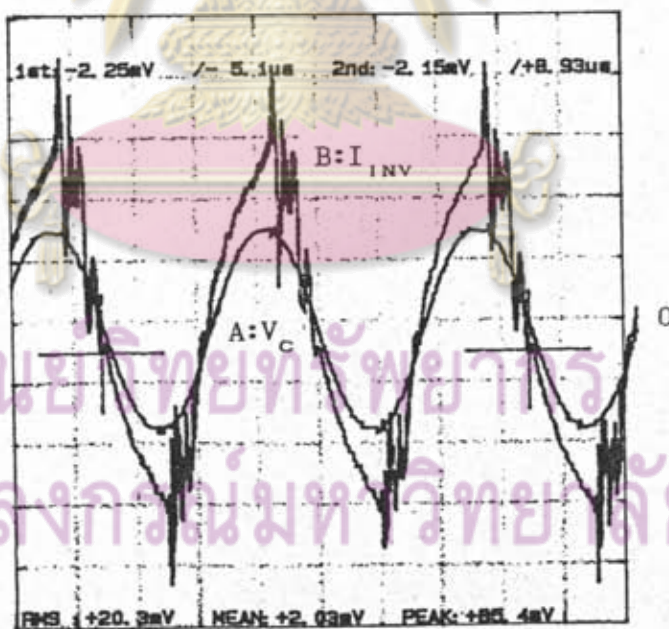
รูปที่ 4.54 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์



A: 20V/div T: 2us/div

B: 10A/div

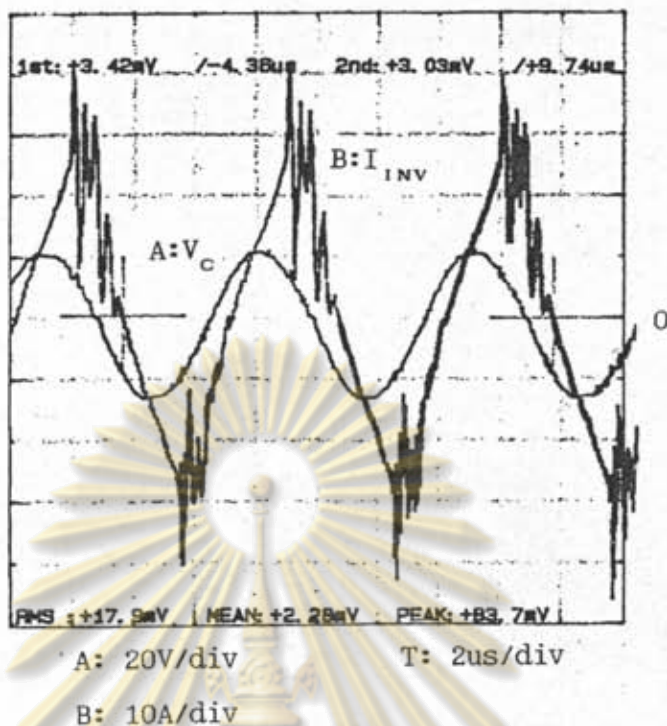
รูปที่ 4.55 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 143 กิโลเฮิรตซ์



A: 20V/div T: 2us/div

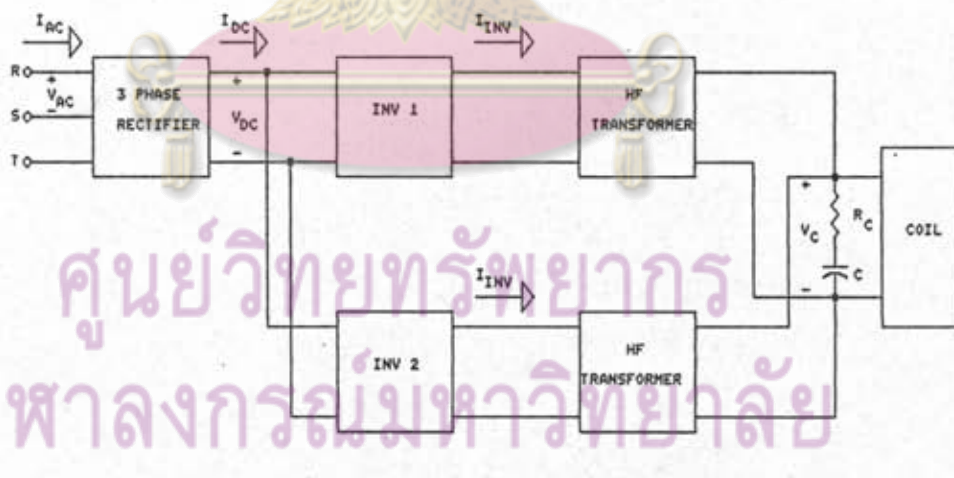
B: 10A/div

รูปที่ 4.56 กระแสประจุของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 143 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 4.57 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 143 กิโลเฮิร์ตซ์

4.2.5 ผลการวัดค่ากำลังด้านเข้าและกำลังที่ขดลวดให้ความร้อน



รูปที่ 4.58 การวัดกำลังและตัวแปรต่างๆในวงจร

ในการวัดกำลังด้านเข้าของระบบ จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามีขนาด 380 โวลต์ และวัดกำลังด้านเข้าโดยประมาณจากแรงดันไฟตรงและกระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรง โดยในการทดสอบจะวัดค่ากำลังด้านเข้าที่ความถี่ต่างๆ และที่ภาวะโหลดต่าง

สถานะกัน สาเหตุที่ประมาณว่ากระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรงเป็นกระแสตรง แทนที่จะเป็นพัลส์ ดังผลการซิมูเลตในหัวข้อที่ 3.2.2 เพราะเนื่องจากความถี่ของพัลส์กระแสที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อกระแสดังกล่าวผ่านสายไฟตัวนำจะเหมือนกับผ่านตัวเหนี่ยวนำสมมูลเนื่องจากสายไฟตัวนำ ทำให้กระแสที่ตรวจวัดมีลักษณะใกล้เคียงกับกระแสตรง และมีกระแสเหนี่ยวนำที่ความถี่สวิตช์ป้อนอยู่ในการวัดกำลัง และ ตัวแปรต่างๆในวงจรจะพิจารณาตามรูปที่ 4.58 และจากรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ จะเป็นตามนี้

$$V_A = \sqrt{3} I_{AC} V_{AC} \tag{4.1}$$

$$P = I_{DC} V_{DC} \tag{4.2}$$

$$I_{INV} = I_p (TRAN) \tag{4.3}$$

โดยที่ $I_p (TRAN)$ คือกระแสประจุรวมของหม้อแปลงกำลัง

$$P_{loss} (COIL+C+LOAD) = \frac{1}{T} \int n I_{INV} V_C dt \times 2 \tag{4.4}$$

โดยที่ n คืออัตราการแปลงของหม้อแปลง

$$P_{loss} (C) = I_C^2 R_C \tag{4.5}$$

โดยที่ R_C คือความต้านทานสมมูลของตัวเก็บประจุ

$$P_{loss} (TRAN) = (2 I_{INV}^2 R_{cop}) \times 2 \tag{4.6}$$

โดยที่ R_{cop} คือความต้านทานจากลวดตัวนำ และประมาณว่ากำลังสูญเสียเนื่องจากแกนหม้อแปลง มีขนาดเท่ากับกำลังสูญเสียเนื่องจากลวดตัวนำ

$$P_{loss} (INV) = P - P_{loss} (COIL+C+LOAD) - P_{loss} (TRAN) \tag{4.7}$$

$$P_{loss} (COIL+LOAD) = P_{loss} (COIL+C+LOAD) - P_{loss} (C) \tag{4.8}$$

f [kHz]	NO LOAD			FULL LOAD			CURIE POINT		
	V _{DC} [V]	I _{DC} [A]	P _{DC} [W]	V _{DC} [V]	I _{DC} [A]	P _{DC} [W]	V _{DC} [V]	I _{DC} [A]	P _{DC} [W]
125	524	4.3	2253	502	14	7028	516	7	3612
128	524	4.4	2306	501	15.5	7765	516	7	3612
131.6	524	4.5	2358	501	16	8016	515	7.5	3862
135	522	4.65	2427	499	17	8483	516	8	4128
139	520	5.3	2756	497	18	8946	513	8.5	4360
143	519	6.0	3114	496	20	9920	513	10.5	5386

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 กำลังของแหล่งจ่ายไฟตรง ที่ภาวะต่างๆ

f [kHz]	NO LOAD			FULL LOAD			CURIE POINT		
	V _{AC} [V]	I _{AC} [A]	VA [VA]	V _{AC} [V]	I _{AC} [A]	VA [VA]	V _{AC} [V]	I _{AC} [A]	VA (VA)
125	381	5.85	3860	374	16	10365	378	9	5892
128	381	5.9	3893	374	16.8	10883	378	10.2	6678
131.6	381	6.0	3959	373	17.8	11500	377	10.3	6726
135	381	6.25	4124	373	18.4	11887	377	10.5	6856
139	381	6.6	4355	372	19.5	12564	376	10.6	6903
143	381	7.0	4619	372	21	13531	378	12	7815

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 กำลังปรากฏของแหล่งจ่ายไฟสลับ ในภาวะต่างๆ

$$P_{\text{loss}}(\text{LOAD}) = \eta_c P_{\text{loss}}(\text{COIL+LOAD}) \quad (4.9)$$

โดยที่ η_c คือประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อน

$$\eta(\text{TRAN}) = \frac{P_{\text{loss}}(\text{COIL+C+LOAD})}{P_{\text{loss}}(\text{COIL+C+LOAD}) + P_{\text{loss}}(\text{TRAN})} \quad (4.10)$$

โดยที่ $\eta(\text{TRAN})$ คือประสิทธิภาพของหม้อแปลง

$$\eta(\text{INV}) = \frac{P - P_{\text{loss}}(\text{INV})}{P} \quad (4.11)$$

$$\eta_T = \frac{P_{\text{loss}}(\text{LOAD})}{P} \quad (4.12)$$

โดยที่ $\eta(\text{INV})$ คือประสิทธิภาพที่วงจรรีโวลต์เตอร์

โดยที่ η_T คือประสิทธิภาพรวมของระบบ

$$\text{P.F.} = \frac{P}{VA} \quad (4.13)$$

P.F. คือตัวประกอบกำลังของระบบ

ผลการวัดกำลัง และ กำลังปรากฏด้านเข้าแสดงดังตารางที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.7 ตามลำดับ การวัดกำลังที่ขดลวดให้ความร้อนสามารถแสดงดังตารางที่ 4.8 ใน การวัดกำลังที่ขดลวดให้ความร้อน จะใช้ค่าเฉลี่ยของผลคูณของกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงซึ่ง คือกระแสของอินเวอร์เตอร์และแรงดันที่ขดลวดให้ความร้อน การหาค่าเฉลี่ยของผลคูณสามารถ หาได้โดยใช้ storage oscilloscope ตัวอย่างเช่นรูปที่ 4.59 ถึงรูปที่ 4.61 แสดงผลคูณ ของกระแสปฐมภูมิของขดลวดให้ความร้อน และ แรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์ และภาวะไหลตต่างๆ

รูปที่ 4.60 แสดงผลคูณของกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง และ แรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนแบบเห็นเขี้ยว ที่ภาวะมีไหลต ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์ การ หากำลังที่ขดลวดให้ความร้อนจะใช้ค่าเฉลี่ยของผลคูณ รูปที่ 4.60 storage oscilloscope สามารถหาค่าเฉลี่ยของผลคูณได้ 4.07 mV แต่เนื่องจากสายวัดที่ใช้มีอัตราเกาตรงอนแรงดัน

f [kHz]	P(NL) [W]	P(FL) [W]	P(CURIE) [W]
125	704	5094	2034
128	920	6030	2052
131.6	1084	6192	2178
135	1310	6966	2927
139	1872	7326	3474
143	2610	8352	4210

ตารางที่ 4.8 กำลังที่ออกจากหม้อแปลงความถี่สูงในภาวะโหลดต่างๆ

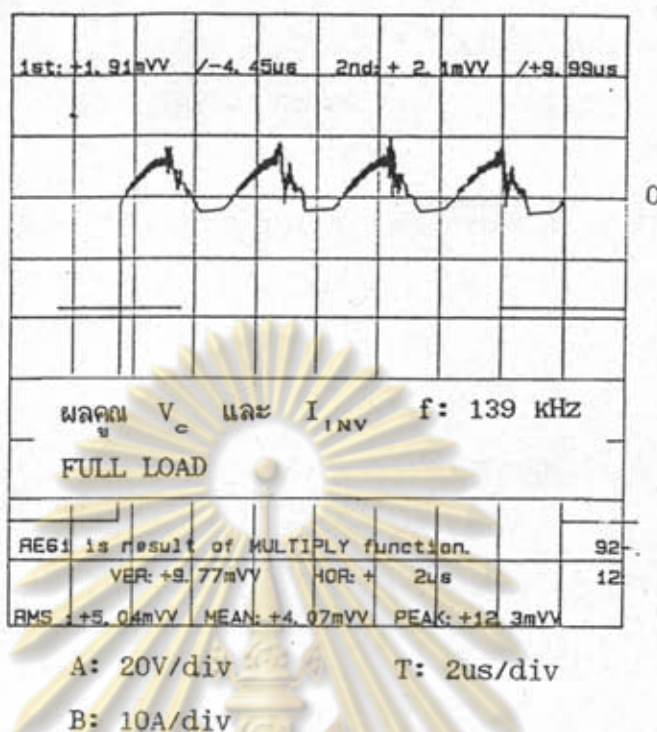


A: 20V/div

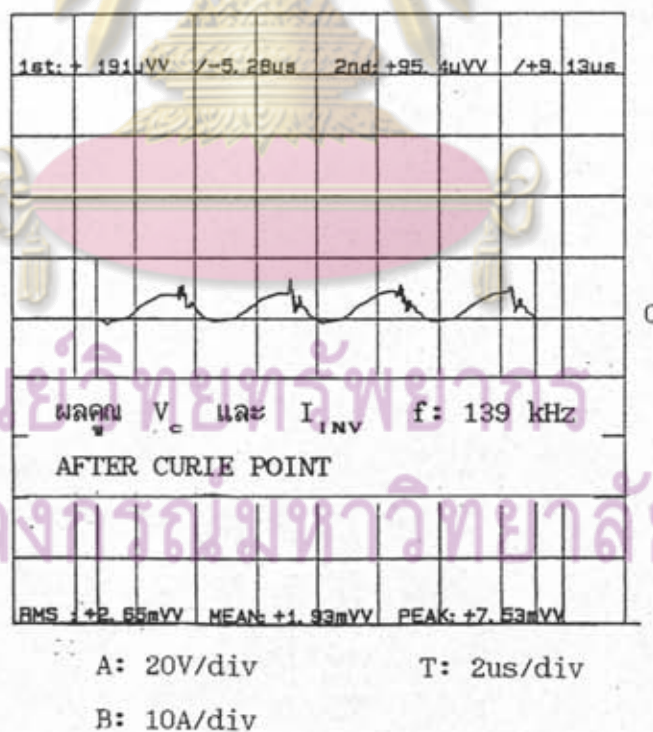
T: 2us/div

B: 10A/div

รูปที่ 4.59 ผลคูณกระแสอินเวอร์เตอร์และแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 139 kHz



รูปที่ 4.60 ผลคูณกระแสอินเวอร์เตอร์และแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 139 kHz



รูปที่ 4.61 ผลคูณกระแสอินเวอร์เตอร์และแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 139 kHz

f [kHz]	V_c (NL) [V]	V_c (FL) [V]	V_c (CURIE) [V]
125	20.5	17.0	11.7
128	22.6	19.1	12.4
131.6	24.0	19.1	12.7
135	26.9	21.2	17.7
139	32.2	23.3	17.0
143	37.5	23.3	17.0

ตารางที่ 4.9 แรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะต่างๆ

f [kHz]	P(NL) [W]	P(FL) [W]	P(CURIE) [W]
125	255	174	82.5
128	326	232	97.5
131.6	388	245	109
135	511	318	221
139	773	407	215
143	1111	431	228

ตารางที่ 4.10 กำลังสูญเสียที่ตัวเก็บประจุรับปรุงตัวประกอบกำลัง

f [kHz]	P(NL) [W]	P(FL) [W]	P(CURIE) [W]
125	449	4920	1951
128	593	5798	1954
131.6	696	5947	2069
135	799	6647	2706
139	1099	6919	3259
143	1498	7921	3982

ตารางที่ 4.11 กำลังที่ชดเชยให้ความร้อนและที่ใช้งานในภาวะต่างๆ

f [kHz]	P(NL) [W]	P(FL) [W]	P(CURIE) [W]
125	0	3936	1561
128	0	4638	1564
131.6	0	4790	1655
135	0	5318	2165
139	0	5535	2607
143	0	6337	3186

ตารางที่ 4.12 กำลังที่ใช้งานในภาวะต่างๆ

f [kHz]	I (NL) [A]	I (FL) [A]	I (CURIE) [A]
125	16.7	20	20.7
128	15.5	19.5	20.3
131.6	14.1	19.6	19.6
135	12.9	19.3	18.3
139	10.6	19.3	18
143	8.52	20.3	17.9

ตารางที่ 4.13 ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ในภาวะโหลดต่างๆ

f [kHz]	P (NL) [W]	P (FL) [W]	P (CURIE) [W]
125	284	408	437
128	245	388	412
131.6	203	392	392
135	170	380	342
139	115	380	330
143	74.0	420	327

ตารางที่ 4.14 กำลังสูญเสียที่หม้อแปลง 2 ชุด = $4[I_{INV}^2 R_{COP}]$

เป็น 100:1 และตัวหยั่งกระแสที่ใช้มีขนาด 10 A/div นอกจากนี้ขณะวัดกระแสโดยใช้ตัวหยั่งกระแสจะต้องให้ช่องวัดที่ต่อกับตัวหยั่งกระแส ของ storage oscilloscope มีขนาด 10 mV/div ดังนั้นกำลังที่อ่านจาก storage oscilloscope จะมีค่า

$$\begin{aligned} \text{กำลังเฉลี่ย} &= \frac{4.07 \times 10^{-3} \times 100 \times 10}{10 \times 10^{-3}} \\ &= 407 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากอัตราการแปลงแรงดันของหม้อแปลงกำลังมีขนาด 9:1 และในวงจรจะมีอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ 2 ชุดแสดงว่ากำลังที่ขดลวดให้ความร้อนจะมีขนาด

$$\begin{aligned} &= 407 \times 2 \times 9 \\ &= 7326 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

การหาค่ากำลังที่ขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะอื่น จะมีวิธีเดียวกับที่แสดงข้างต้นจึงไม่แสดงวิธีการคำนวณ เพียงแต่นำผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8

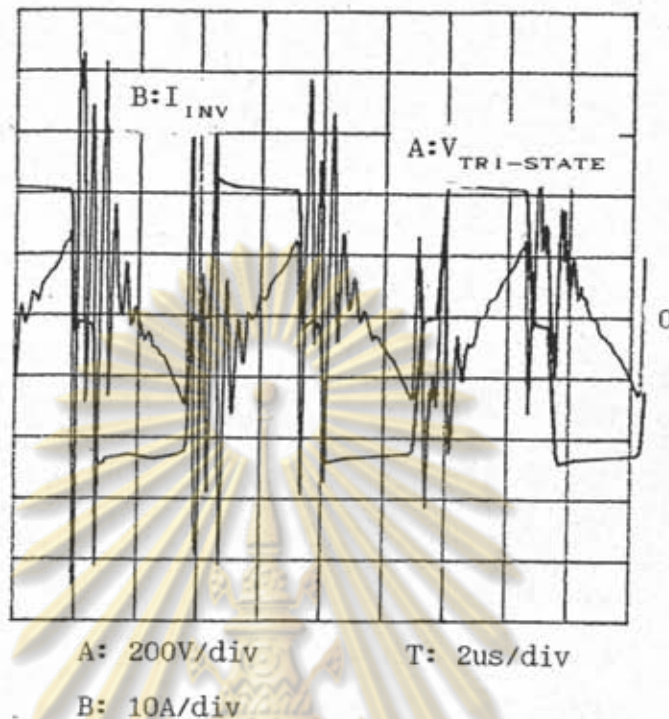
เนื่องจากกำลังสูญเสีย ที่ได้จากค่าเฉลี่ยผลคูณของกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง และแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เป็นกำลังที่เกิดจากขดลวดให้ความร้อนและกำลังที่สูญเสียที่ตัวเก็บประจุชุด เซย์ตัวประกอบกำลัง ดังนั้นจึงต้องคำนวณกำลังสูญเสียที่ตัวเก็บประจุ โดยประมาณจากกระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุและความต้านทานสมมูลเนื่องตัวเก็บประจุ โดยถ่วงกำลังส่วนที่สูญเสียไปที่ตัวเก็บประจุออกจากกำลังที่วัดได้ที่ขดลวดให้ความร้อนจะได้กำลังที่เกิดจากตัวขดลวดให้ความร้อน และ จากชิ้นงาน ในการหาค่ากำลังที่สูญเสียที่ตัวเก็บประจุจะประมาณจากค่าการวัดในหัวข้อที่ 3.4.2.2 จากหัวข้อที่ 3.4.2.2 พบว่าค่าความเก็บประจุโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 48.94 ไมโครฟารัด และความต้านทานสมมูลมีค่าเฉลี่ยโดยประมาณ 0.41 มิลลิโอห์ม ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวัดแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อนหรือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุชุด เซย์ตัวประกอบกำลัง ตารางที่ 4.10 แสดงกำลังสูญเสียที่ตัวเก็บประจุชุด เซย์ตัวประกอบกำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

4.2.6 กำลังที่ชิ้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำลังที่ขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำและที่ชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ 4.11 จากค่าที่แสดงในตารางที่ 4.11 สามารถประมาณกำลังที่ชิ้นงานได้รับจากประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังของขดลวดให้ความร้อน จากหัวข้อที่ 3.4.1 ที่กล่าวถึงการวัดค่าความต้านทานสมมูลของขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ภาวะมีโหลด และ ไร้โหลด ที่อุณหภูมิห้อง จึงสามารถประมาณค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของขดลวดให้ความร้อนโดยประมาณได้ 80% ดังนั้นกำลังที่ชิ้นงานได้รับสามารถแสดงดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.62 แรงดันสามสถานะและกระแสของอินเวอร์เตอร์

4.2.7 กำลังสูญเสียที่หม้อแปลงส่งผ่านกำลัง และ วงจรอินเวอร์เตอร์

การหากำลังสูญเสียที่วงจรอินเวอร์เตอร์โดยตรงไม่สามารถกระทำได้ เพราะต้องวัดรูปคลื่นแรงดันแบบสามสถานะ และกระแสที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์พร้อมกัน ซึ่งการวัดสัญญาณทั้งสองพร้อมกันจะเกิดสัญญาณกวนขึ้น ดังรูปที่ 4.62 พบว่าถ้านำสัญญาณทั้งสองไปคำนวณต่อค่าที่คำนวณได้ย่อมผิดพลาดมากจนเมื่ออาจเชื่อถือได้ จึงต้องประมาณกำลังสูญเสียที่วงจรอินเวอร์เตอร์จากผลต่างของกำลังที่แหล่งจ่ายไฟตรงและกำลังที่คร่อมขดลวดให้ความร้อน จากนั้นลบด้วยกำลังสูญเสียที่เกิดจากหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง การหาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดจากหม้อแปลงกำลัง จะประมาณจากค่ากระแสที่ผ่านหม้อแปลงกำลัง และความต้านทานเนื่องจากขดลวดตัวนำ จากหัวข้อที่ 3.3.2 พบว่าความต้านทานเนื่องจากขดลวดตัวนำของหม้อแปลงความถี่สูงแต่ละชุดโดยเฉลี่ยมีค่า 0.255 โอห์ม ส่วนกำลังสูญเสียในแกนของหม้อแปลง ตามปกติจะประมาณให้หมีค่าเท่ากับกำลังสูญเสียเนื่องจากขดลวดตัวนำ แต่ในความเป็นจริงคาดว่ากำลังสูญเสียในแกนของหม้อแปลงจะมีค่าต่ำกว่าที่ประมาณไว้ เพราะได้ออกแบบให้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กมีค่าค่อนข้างต่ำ ตารางที่ 4.13 แสดงค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ผ่านหม้อแปลง

ความถี่สูง ตารางที่ 4.14 แสดงกำลังที่สูญเสียไปที่หม้อแปลงส่งผ่านกำลังทั้งหมด และ ตารางที่ 4.15 แสดงกำลังสูญเสียที่วงจรรีโตนเวอ์เตอร์แบบสามสถานะ

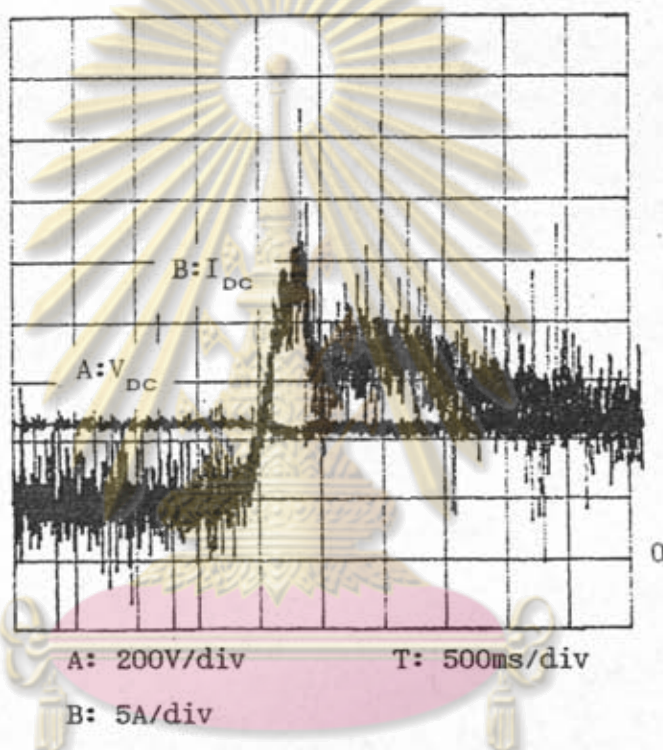
f [kHz]	P(NL) [W]	P(FL) [W]	P(CURIE) [W]
125	1265	1526	1141
128	1141	1348	1148
131.6	1072	1432	1293
135	947	1137	859
139	769	1240	556
143	423	1148	850

ตารางที่ 4.15 กำลังสูญเสียที่วงจรรีโตนเวอ์เตอร์แบบสามสถานะ

4.2.8 รูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายไฟตรง

ดังที่กล่าวข้างต้นกระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรงควรจะเป็นพัลส์ความถี่สูง แต่เนื่องจากกระแสดังกล่าวผ่านสายไฟตัวนำ ซึ่งที่ความถี่สูงสายไฟตัวนำจะประพฤติตนเป็นตัวกรองกระแสที่เป็นพัลส์ความถี่สูงให้มีความราบเรียบขึ้น ดังนั้นกระแสที่วัดได้จึงมีลักษณะคล้ายกระแสไฟตรงเพียงแต่มีกระแสแฉกระเนื่องที่มีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตชิงนั่นเอง ผลการวัดรูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายไฟตรงสามารถแสดงดังรูปที่ 4.63 จากรูปจะแสดงแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรง และกระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรงพร้อมกัน โดยขณะไว้โหลดกระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรงจะมีค่าประมาณ 5 - 6 แอมแปร์ และแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟตรงจะมีค่าประมาณ 520 โวลต์ แต่เมื่อใช้ชิ้นงานในขดลวดให้ความร้อน กระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรงจะค่อยๆเพิ่มมากขึ้นและแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงจะลดลงเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 0.5 วินาที กระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรงจะขึ้นไปสูงสุดประมาณ 20 - 25 แอมแปร์ แล้วกระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรงจะมีขนาดลดลง สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากคุณสมบัติของโหลดเปลี่ยนแปลงกับเวลา

เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน ขณะเริ่มแรกเมื่อใส่ชิ้นงานลงในชดลวดให้ความร้อน ชิ้นงานจะมีค่าสภาพความต้านทานค่อนข้างต่ำประมาณอุณหภูมิห้อง และมีค่าความซาบซึมทางแม่เหล็กค่อนข้างสูง หลังจากเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนระยะเวลาหนึ่ง ค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น กำลังที่ชิ้นงานได้รับจะมีขนาดมากขึ้น กระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรงจึงมีค่ามากขึ้นตามดั่งรูป จนเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนถึงจุดคูรี ค่าความซาบซึมทางแม่เหล็กของชิ้นงานจะมีค่าลดลงเท่าค่าความซาบซึมของสกุญญากาศ มีผลให้กำลังที่ชิ้นงานได้รับมีขนาดลดลง กระแสของแหล่งจ่ายไฟตรงจึงมีขนาดลดลงด้วย



รูปที่ 4.63 กระแสและแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

4.3 สรุปผลการทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากการทดสอบมีทั้งทางไฟฟ้าและทางโลหวิทยา และผู้วิจัยขาดความรู้พื้นฐานทางโลหวิทยา จึงขอสรุปผลเพียงทางไฟฟ้า จากการทดสอบพบว่าความถี่มีผลต่อการทำงานของวงจร และตัวแปรทางไฟฟ้าในวงจร เพราะถ้าพิจารณาโครงสร้างทางไฟฟ้าของชดลวดให้ความร้อนและชิ้นงาน จะมีวงจรสมมูลเป็นตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบให้ดีขึ้น จึงใส่ตัวเก็บประจุขนานกับชดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และเพื่อให้ได้แรงดันที่คร่อมชดลวดเป็นไปตามที่ต้องการ จึงต้องมีหม้อแปลงความถี่สูงในการส่ง

ผ่านกำลังต่อระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ และชดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ถ้าพิจารณาวงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูงพบว่าจะมีวงจรสมมูลเป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงความถี่สูง วงจรสมมูลของทั้งระบบจึงประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ ตัวเหนี่ยวนำ โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ การเปลี่ยนความถี่จึงมีผลต่อตัวแปรทางไฟฟ้าของระบบ จากการทดสอบพบว่า ถ้าเพิ่มความถี่ของระบบให้สูงขึ้น

แรงดันคร่อมชดลวดให้ความร้อนจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังที่ชดลวดให้ความร้อน จะทำให้อิมพีแดนซ์สมมูลของชดลวดให้ความร้อนและตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์เนื่องจากความเหนี่ยวนำอนุกรม ดังนั้นแรงดันคร่อมชดลวดให้ความร้อนจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น

กำลังสูญเสียที่ตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เพราะแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงขึ้น และเมื่อความถี่สูงขึ้นตัวเก็บประจุจะมีอิมพีแดนซ์ลดลง ดังนั้นกระแสชดเชยที่ตัวเก็บประจุจ่ายจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้กำลังสูญเสียไปที่ตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้นด้วย

กำลังที่ชดลวดให้ความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น เพราะเมื่อความถี่สูงขึ้นตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง จะจ่ายกระแสชดเชยให้แก่ชดลวดให้ความร้อนมากขึ้น จึงทำให้อิมพีแดนซ์ไหลผ่านขึ้นงานมากขึ้น และ นอกจากนี้เมื่อความถี่สูงขึ้นความต้านทานสมมูลเนื่องจากขึ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

กระแสที่ภาวะไร้โหลดจะมีขนาดเล็กลงทั้งนี้เพราะ อิมพีแดนซ์สมมูลของทั้งระบบมีขนาดเพิ่มขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร

และถ้าพิจารณาที่ความถี่ใดๆพบว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ภาวะไร้โหลดแรงดันคร่อมชดลวดให้ความร้อนจะมีขนาดมากที่สุด และเมื่อมีขึ้นงานในชดลวดให้ความร้อน แรงดันคร่อมชดลวดให้ความร้อนจะมีขนาดลดลง และเมื่อขึ้นงานร้อนแดง แรงดันที่คร่อมชดลวดให้ความร้อนจะมีขนาดลดลงอีก นอกจากนี้กระแสจากอินเวอร์เตอร์จะมีการปรับตัวทั้งขนาด และมุมประกอบกำลังระหว่างกระแสและแรงดันแบบสามสถานะ กล่าวคือขณะไร้โหลด มุมประกอบกำลังระหว่างกระแสและแรงดันจะค่อนข้างใหญ่ แต่เมื่อมีโหลด กระแสจะปรับตัวไปในลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์ และมุมประกอบกำลังจะมีขนาด

เล็กลง จนเมื่อชิ้นงานร้อนแดงกระแสดจะปรับตัวไปในลักษณะคล้ายกับภาวะไว้ไหลด คือมีรูปร่างเป็นลักษณะสามเหลี่ยม และจะมียอดกระแสดที่ค่อนข้างสูง โดยสาเหตุมาจากการที่ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้า และทางแม่เหล็ก ขณะเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน คือเมื่อชิ้นงานเริ่มร้อน ค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงานจะสูงขึ้น ค่าความต้านทานสมมูล และความเหนียวนำสมมูลของขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงาน จะมีขนาดสูงขึ้น เมื่อรวมกับค่าความจุของตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง ทำให้ระบบถูกปรับปรุงตัวประกอบกำลัง กระแสดที่ได้จึงมีรูปร่างที่ตีขึ้นใกล้เคียงสัญญาณไซน์ และแรงดันที่ขดลวดจะมีขนาดลดลงเนื่องจากผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบได้เปลี่ยนไป จนเมื่อชิ้นงานร้อนแดงหรือถึงจุดคูรี ค่าความซาบซึมทางแม่เหล็กของชิ้นงานจะลดลง เป็นค่าความซาบซึมของสุญญากาศ มีผลให้ความต้านทานสมมูลและความเหนียวนำสมมูล เนื่องจากขดลวดให้ความร้อน และชิ้นงาน มีค่าลดลง ทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง ไม่สามารถช่วยปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบให้ดีขึ้น กระแสดจึงมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมคล้ายภาวะไว้ไหลด

จากการทดสอบสามารถหาค่าประสิทธิภาพ ของวงจรรินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ และหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง ได้ดังตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพ และ ตัวประกอบกำลังโดยรวมของระบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.17 และ ตารางที่ 4.18 ตามลำดับ โดยจะคำนวณตามสมการที่ (4.10) ถึงสมการที่ (4.13)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

f [kHz]	η (INVERTER) [%]			η (TRANSFORMER) [%]		
	NO LOAD	FULL LOAD	CURIE	NO LOAD	FULL LOAD	CURIE
125	43.9	78.3	68.4	71.2	92.6	82.3
128	50.5	82.6	68.2	79.0	94.0	83.3
131.6	54.5	82.1	66.5	84.2	94.0	84.7
135	61.0	86.6	79.2	88.5	94.8	89.5
139	72.1	86.1	87.2	94.2	95.1	91.3
143	86.2	88.4	84.2	97.2	95.2	92.8

ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ
และของหม้อแปลงความถี่สูง ที่ภาวะต่างๆ

f [kHz]	TOTAL EFFICIENCY ($\eta_c = 80\%$) [%]		
	NO LOAD	FULL LOAD	CURIE
125	19.9	56.0	43.2
128	25.7	59.7	43.3
131.6	29.5	59.7	42.9
135	32.9	62.7	52.4
139	39.9	61.9	59.8
143	48.1	63.9	59.1

ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพรวมของระบบ ในภาวะต่างๆ

f [kHz]	POWER FACTOR		
	NO LOAD	FULL LOAD	CURIE
125	0.584	0.678	0.613
128	0.592	0.714	0.540
131.6	0.596	0.697	0.574
135	0.588	0.714	0.602
139	0.633	0.712	0.632
143	0.674	0.733	0.689

ตารางที่ 4.18 ตัวประกอบกำลังของระบบ ในภาวะต่างๆ