

บทนำ

การตรวจวัดปริมาณคลอไรด์ ไอออนในทางการแพทย์ นิยมใช้ตรวจวัดเพื่อการวินิจฉัยโรค cystic fibrosis และสถานะไม่สมดุลของอิเล็กโทรไลต์(1,2,3,4) ซึ่งการตรวจวัดคลอไรด์ไอออนในห้องปฏิบัติการแต่ละแห่ง อาจใช้วิธีการที่แตกต่างกันดังนี้

วิธี mercuric thiocyanate อาศัยหลักการรวมตัวของคลอไรด์ ไอออน กับเมอคิวริก ไอออน และใส่ทีโอโซยานนท์ ไอออนให้ออกไปทำปฏิกิริยากับเฟอริกไอออน แล้วเกิดสารประกอบสีแดง ซึ่งความเข้มของสีจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับคลอไรด์ไอออน แต่เนื่องจากการรวมตัวของคลอไรด์ ไอออน กับเมอคิวริก ไอออนมีความจำเพาะต่ำ ทำให้ไอออนที่มีประจุลบบางตัว โดยเฉพาะโบรไมด์ ไอออน รวมตัวกับเมอคิวริก ไอออน ทำให้ตรวจวัดค่าได้สูงกว่าค่าจริง(5) และถ้านำวิธีนี้ไปตรวจวัดคลอไรด์ในซีรัมที่มีไขมันมาก(hyperlipemic serum) จะตรวจวัดค่าได้สูงกว่าค่าจริง เพราะไขมันทำให้เกิด light scattering effect (6) ถึงแม้ว่าในระยะหลังจะได้มีการพัฒนาวิธีตรวจวัดให้มีความจำเพาะมากขึ้น โดยใช้เอนไซม์ chloride - dependent alpha amylase แต่ก็ยังถูกรบกวนจากโบรไมด์ ไอออนซีรัมที่มีสีแดงจัด(hemolyzed serum) มีสีเหลืองจัด(icteric serum) มีกรดยูริกสูง(uremic serum)(7,8) นอกจากนี้เครื่องวิเคราะห์อัตโนมัติขนาดเล็กที่ใช้หลักการนี้ ในการตรวจวัด ยังพบว่าความเที่ยง(precision) และความแม่นยำ(accuracy) ของการตรวจวัดคลอไรด์ ไม่ดีเท่ากับอิเล็กโทรไลต์ตัวอื่น ๆ (9,10)

วิธีตรวจคลอไรด์ ไอออนที่กำลังนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือการวัดด้วยอิเล็กโทรดจำเพาะ(ion selective electrode) เพราะมีความจำเพาะต่อการวัดคลอไรด์ไอออนมากขึ้น และสามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียที่

เครื่องมือมีราคาแพง ค่าบำรุงรักษาและค่าน้ำยาแพง นอกจากนี้ยังตรวจวัดได้ค่าสูงกว่าความจริงมาก ถ้าถูกรบกวนจาก allopurinol, adenine, hypoxanthine(11,12), bromide ion(13,14), thiocyanate และ iodide(15)

การตรวจวัดคลอไรด์ ไอออนโดยวิธี amperometric coulometric titration เป็นวิธีอ้างอิง(reference method) สำหรับการตรวจวัดคลอไรด์ ไอออน เพราะเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่าตรวจวัดค่าได้ถูกต้องมากที่สุด และถูกรบกวนจากไอออนอื่น ๆ น้อยที่สุด(16,17) แต่วิธีดังกล่าวกลับไม่ค่อยมีผู้นิยมใช้ในปัจุบัน เพราะเครื่องมือมีราคาแพง และใช้งานไม่ค่อยสะดวก ดังนั้นการวิจัยเพื่อสร้างเครื่องตรวจวัดคลอไรด์ ไอออน อย่างง่ายและมีราคาถูก จะทำให้ห้องปฏิบัติการต่าง ๆ หันมานิยมใช้เครื่อง chloridmeter มากขึ้น อันจะส่งผลให้การตรวจวัดมีความผิดพลาดน้อยลง และกระตุ้นให้มีการพยายามสร้างเทคโนโลยีทางห้องปฏิบัติการ อันจะนำไปสู่การพัฒนาทางเทคโนโลยีเพื่อการพึ่งพาตนเองของประเทศในอนาคตต่อไป

วัตถุประสงค์

เนื่องจากยังไม่เคยมีรายงานการทดลองสร้างเครื่อง chloridometer ที่อาศัยหลักการ amperometric coulometric titration มาก่อนในประเทศไทย ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อสร้างเครื่อง chloridometer ต้นแบบจำนวน 1 เครื่อง โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่าย มีต้นทุนการผลิตต่ำ และมีประสิทธิภาพดี

วัสดุและอุปกรณ์

1. Multimeter
2. อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
3. ลวดเงินบริสุทธิ์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 มม.

เครื่องมือ

1. เครื่อง BUCHLER digital chloridometer รุ่น 4-2500

สารเคมี

1. Acid reagent ประกอบด้วย conc. HNO_3 6.4 มล. glacial acetic acid 100 มล.
ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน 1,000 มล.
2. Gelatin indicator ประกอบด้วย gelatin : thymol : thymol blue ในอัตราส่วน 60 : 1 : 1 ในน้ำกลั่น
3. Stock standard sodium chloride solution ความเข้มข้น 1,000 mmol/l
4. Working standard sodium chloride solution เตรียมโดยเจือจาง stock standard solution ด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ให้มีความเข้มข้นต่าง ๆ ตามต้องการ
5. Commercial control serum ใช้สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของการตรวจวัดมีดังนี้
 - 5.1 Monitrol ES level I Lot No. LTS-32
 - 5.2 Monitrol ES level II Lot No. LTS-32
 - 5.3 Pathonorm H
 - 5.4 Pathonorm L
 - 5.5 Autonom

วิธีทดลอง

ในการวิจัยได้ทำการศึกษาระบบการทำงาน และวงจรการทำงานของเครื่องตรวจวัดคลอไรด์ ไอออนที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ตัวอย่างเช่นเครื่องของบริษัท BUCHLER INSTRUMENT, CORNING SCIENTIFIC INSTRUMENT, RADIOMETER และ FISK ASSOCIATED INC. แล้วจึงได้เลือกออกแบบเครื่อง

ดังนี้

1. การออกแบบองค์ประกอบหลัก มีสี่ส่วนที่สำคัญคือ(รูปที่ 1)

1.1 ภาคนำเนิสัญญาณนาฬิกา(clock) มีหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ที่สามารถปรับค่าได้เพื่อป้อนให้ภาคแสดงผล โดยใช้ IC 555 เป็นตัวสร้างสัญญาณนาฬิกา ซึ่งปรับความถี่ของสัญญาณได้(VR1 ในรูปที่ 2) สัญญาณนาฬิกานี้จะถูกสร้างตลอดเวลา แต่แค่การปล่อยสัญญาณออกไปให้ภาคแสดงผลจะถูกควบคุมโดย IC 7476

1.2 ภาคแสดงผล(read out) มีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณนาฬิกาให้เป็นค่าของคลอไรด์ ไอออน โดย IC 7447 รับสัญญาณนาฬิกาจาก IC 555 แล้วขับ LED (light emitting diode) 7 ส่วน ชนิดอานโคตรวม(common anode)(รูปที่ 3)

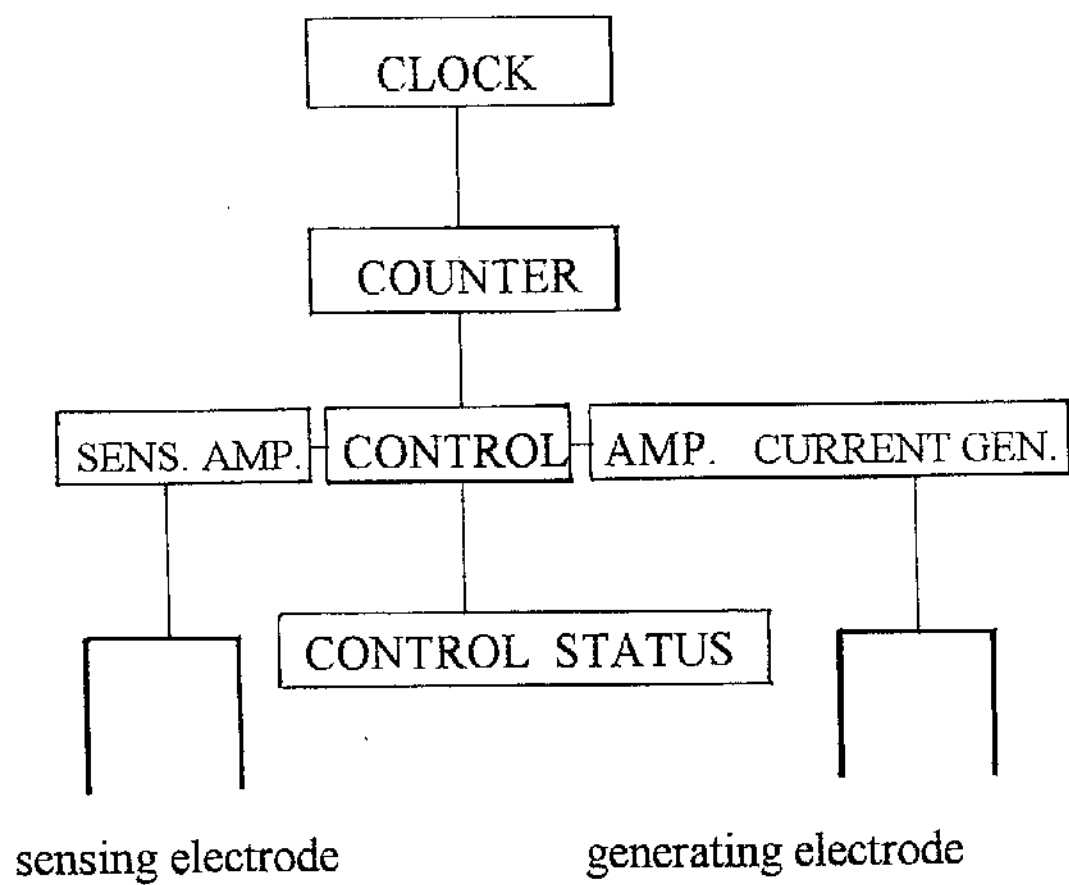
1.3 ภาคควบคุมกระแสไฟฟ้า มีหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่เพื่อจ่ายให้กับ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ รวมทั้ง sensing electrode และ generating electrode โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง(direct current, DC) 2 ชุดแยกกราวด์(ground) ออกจากกัน กล่าวคือ

ชุดที่ 1 เป็นไฟ $\pm 12\text{ V}$ และ $+5\text{ V}$ ใช้จ่ายไฟให้กับวงจรขยายและวงจรแสดงผล

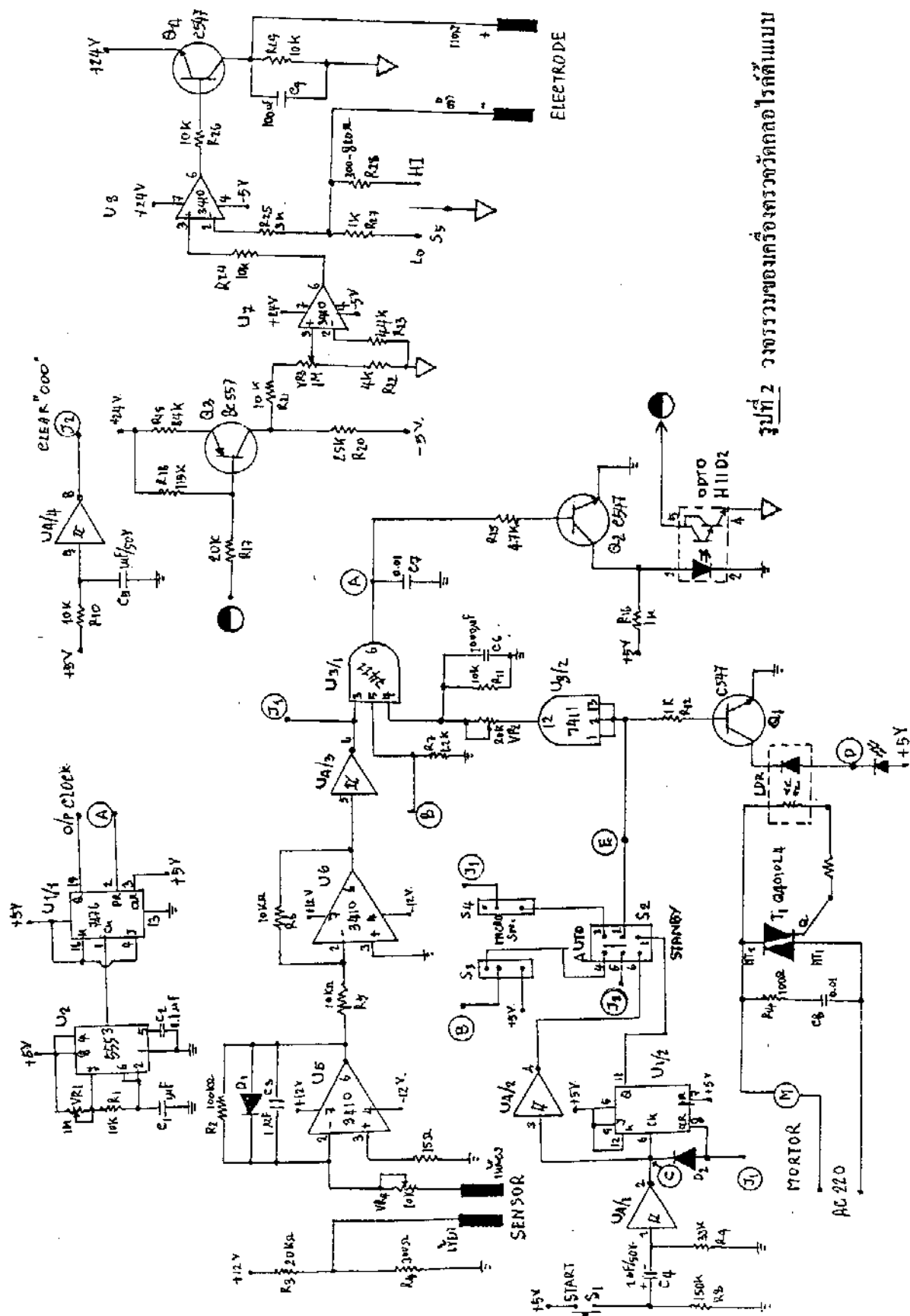
ชุดที่ 2 เป็นไฟ $+24\text{ V}$ และ -5 V จ่ายไฟให้กับชุดไทเทรต

แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงใช้ไอซีควบคุม(IC 7812, 7912, 7805, 7824 และ 7905) ดังรูปที่ 4 และยังใช้ตัวเก็บประจุ(capacitor) เข้ามาช่วยควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีความคงที่มากที่สุด

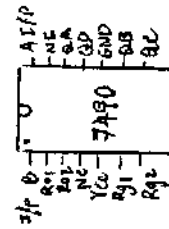
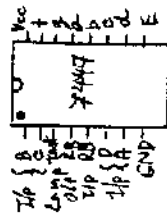
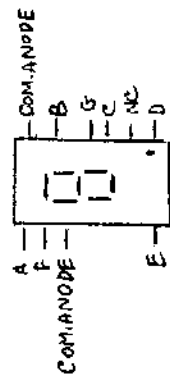
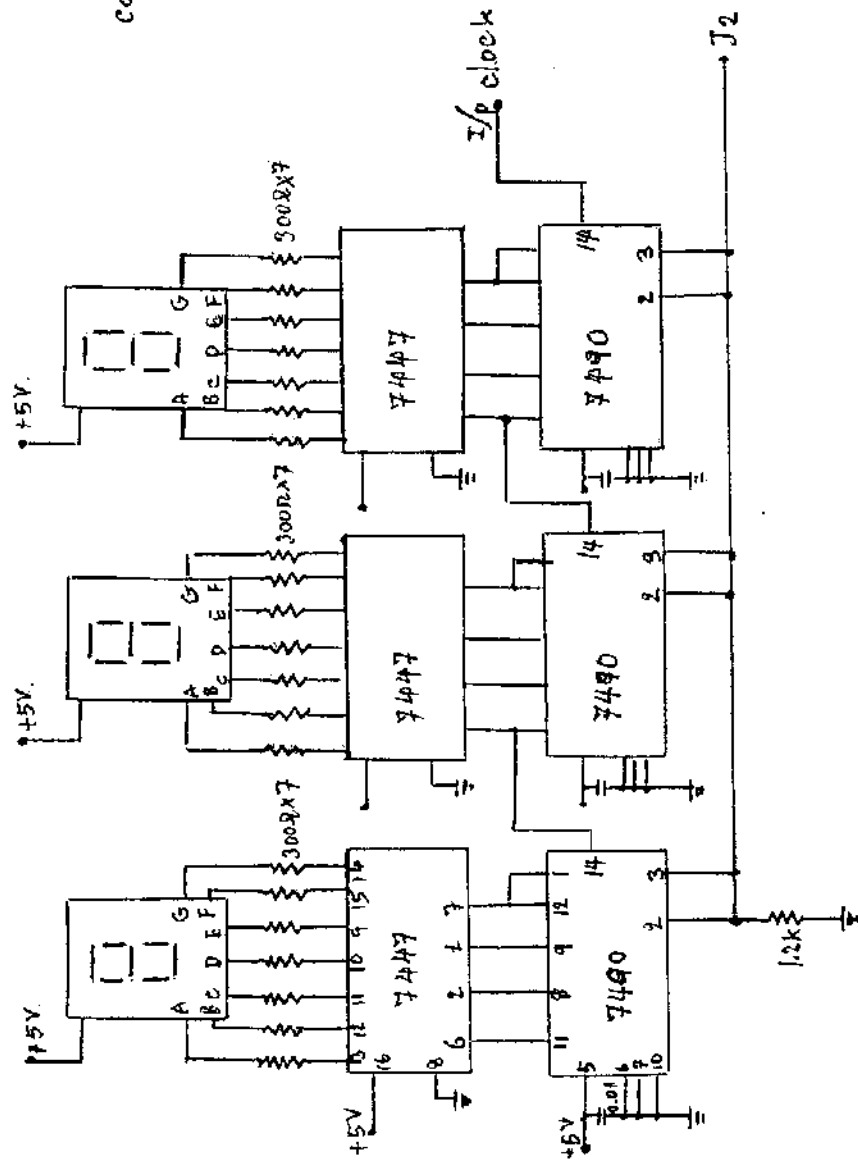
1.4 ภาคควบคุมสถานะ(control status) มีหน้าที่ควบคุมการเริ่ม และการหยุดไทเทรต การแสดงผล และการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อิเล็ก โทรด



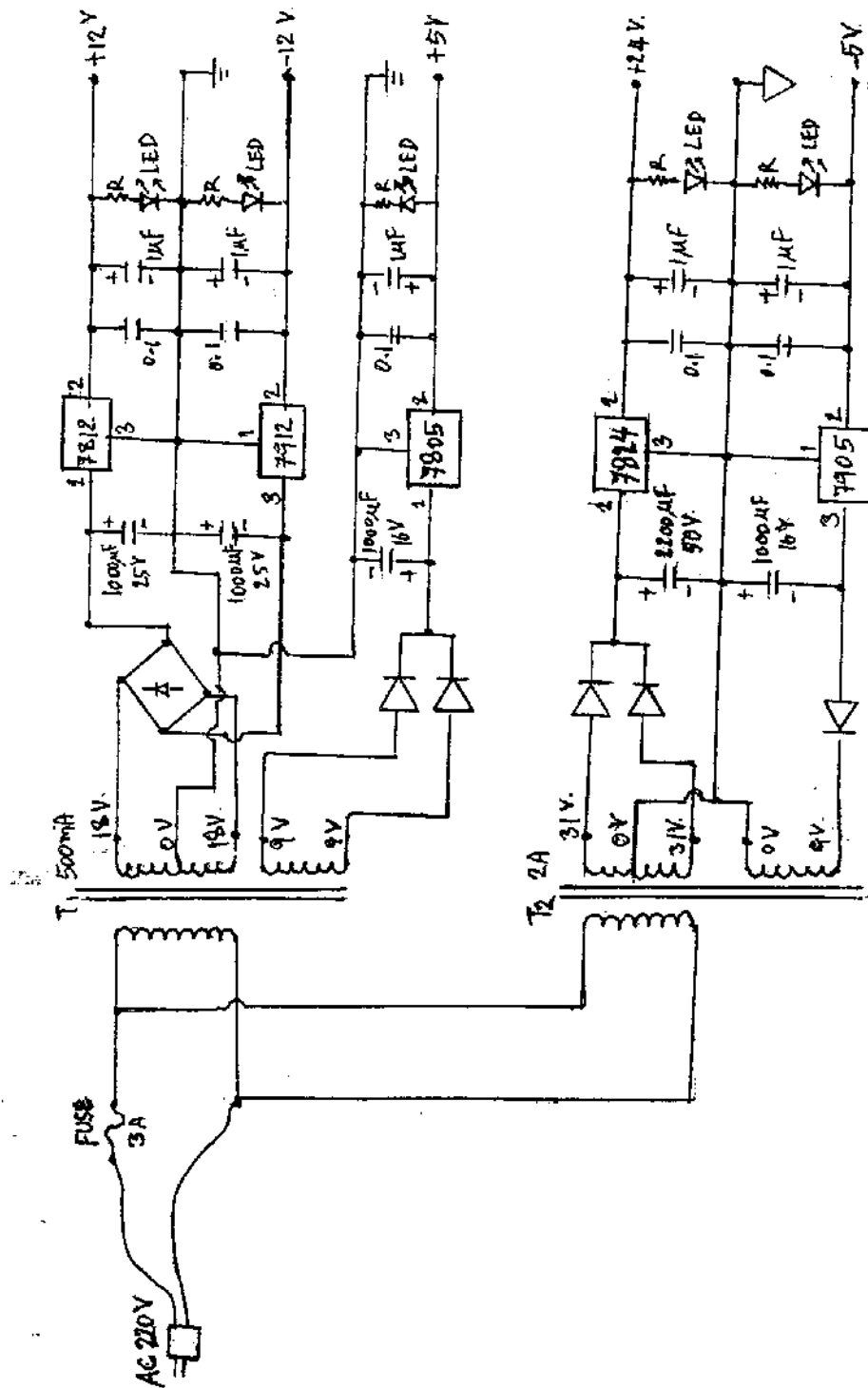
รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างหลักของเครื่องวัดแบบ



รูปที่ 3 วงจรภาคแสดงผล



รูปที่ 4 วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง(directed current circuit)



2. การออกแบบการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องต้นแบบถูกออกแบบให้มีระบบการทำงานของวงจรดังนี้

เมื่อเปิด power switch เครื่องจะแสดงผลเป็น "000" เสมอ โดยการเคลียร์ของ IC U4/4 ด้วยการต่อสัญญาณ เอาท์พุท(output) เข้ากับขา 2 และ 3 ของ IC 7490 ของภาคแสดงผล(J2)

IC 555 ถูกควบคุมการส่งสัญญาณนาฬิกาให้ภาคแสดงผลดังนี้ ถ้ามีสัญญาณที่จุด A(ส่วนที่ต่อกับขา 6 ของ IC 7411) เป็น "0" IC U1/1 จะให้อาท์พุทเป็นศูนย์ แต่ถ้าสัญญาณดิจิทัลเป็น "1" IC U1/1 จะให้อาท์พุทเป็น "1" ทำให้เกิดการจ่ายสัญญาณนาฬิกาให้ภาคแสดงผลเริ่มนับตัวเลข

การทำงานของ IC OP-AMP(U5, U6) ในขณะที่ยังไม่มีการไทเทรต อินพุทของ IC U5 รับสัญญาณจาก sensing electrode มาที่ inverter ของ OP-AMP โดยมี R3 และ R4 แบ่งแรงดันของ 12 โวลต์ ให้ reference probe ของ sensing electrode ในขณะที่ sensing electrode จุ่มอยู่ในน้ำยาหรือยังไม่ได้จุ่มอยู่ในน้ำยา probe ที่ต่ออยู่กับขา 2 ของ IC U5 จะอยู่ในลักษณะลอยตัวคือ มีค่าไม่แน่นอน ทำให้อาท์พุทที่ขา 6 ของ IC U6 เป็นลบ หรือ "0" ผ่าน inverter IC U4/3 ทำให้อินพุทขา 3 ของ IC U3/1 เป็น "1" รออยู่ เมื่อยก vial น้ำยาขึ้น จะทำให้ไมโครสวิตช์(S3) ต่อไฟ +5V อินพุทที่ขา 5 ของ IC U3/1 เป็น "1" แต่เครื่องจะยังไม่ทำงาน ถ้าสวิตช์(S2) อยู่ที่ตำแหน่ง Standby แต่จะทำงานเมื่อกดสวิตช์ Start(S1) ซึ่งเป็นวงจรทรiggerซึ่งประกอบด้วย IC U4/1 และ U1/2 ทำให้อาท์พุทดิจิทัลที่จุด E เป็น "1" ในขณะที่สัญญาณที่จุด C เป็น "0" ผ่าน inverter IC U4/2 ให้อาท์พุทเป็น "1" แล้วส่งไปเคลียร์ตัวเลขที่ภาคแสดงผลให้เป็น "000" เมื่อกด Start ทุกครั้ง และที่ขา B ของ Q1 มีโวลต์เล็กน้อย ทำให้ขา C เป็น "0" LDR กระตุ้น triac ให้ทำงาน มอเตอร์ควบคุม stirrer จึงทำงาน(มีไฟแสดงการทำงานที่ด้านหน้าของเครื่อง)

สัญญาณจากจุด E เป็น "1" ผ่านวงจร AND GATE ของ IC U3/2 ได้สัญญาณเป็น "1" และผ่านวงจรหน่วงเวลา C6 และ R11 ดังนั้นเอาต์พุต ของ IC U3/1 เป็น "1" ที่จุด A (เนื่องจากสัญญาณลิจิตอลที่ขา 3, 4 และ 5 เป็นบวก) ทำให้ขา C ของ Q2 เป็น "0" OPTO switch ไม่ทำงาน ทำให้เอาต์พุตที่ขา C ของ Q3 เป็นบวก ทำให้เอาต์พุตของ IC OP-AMP(U7) เป็นบวกด้วย แล้วส่งสัญญาณผ่าน OP-AMP(U8) {ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์เพื่อรักษาศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ generating electrode (24V)} ทำให้ไฟที่ขา B ของ Q4 เป็นบวก Q4 จึงทำงานและจ่ายไฟ 24 โวลต์ ออกมา ขา C ผ่าน generating electrode ทำให้หลอดเงินปล่อยซิลเวอร์ ไอออนออกมา

เมื่อไทเทรตจนถึงจุดยุติ(end point) Sensing electrode (ปรับความไวด้วย VR4, 10K) จะถูกตัดกระแสไฟ เนื่องจาก ความต้านทานภายใน vial ลดลงเรื่อย ๆ จนทำให้โวลต์ที่ขา 2 ของ IC U5 มีค่ามากกว่าขา 3 ทำให้เอาต์พุตที่ขา 6 ของ IC U6 เป็นบวก แล้วส่งผ่าน inverter IC U4/3 ได้สัญญาณเป็น "0" ที่อินพุตขา 3 ของ IC U3/1 ดังนั้นเอาต์พุตของ IC U3/1 เป็น "0" ที่จุด A เนื่องจากถ้าอินพุตที่ขาใดขาหนึ่งเป็น "0" จะทำให้เอาต์พุตเป็น "0" ไฟที่ขา B ของ Q2 เป็น "0" ทำให้ขา C มีโวลต์ OPTO switch ทำงาน Q3 จึงทำงาน ขา C เป็นลบ เอาต์พุต IC U1 เป็นลบด้วย ซึ่งจะเป็นการตัดสัญญาณของภาคแสดงผล ส่วนไฟที่ขา B ของ Q4 เป็นลบ Q4 ไม่ทำงาน ไฟที่ขา C เป็นศูนย์ จึงหยุดการไทเทรต เพราะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ generating electrode ขณะเดียวกันสัญญาณที่จุด A จะเคลียร์ขา 2 ของ IC U1/1 ให้หยุดทำงาน ตัวเลขที่ภาคแสดงผลหยุดนับทันที นอกจากนี้ อินพุตที่ขา 3 ของ IC U3/1 จะเชื่อมโยงผ่าน J1 ไปที่ขา 8 ของ IC U1/2 ให้เอาต์พุตออกมาเป็น "0" มอเตอร์ซึ่งควบคุมการหมุนของ Stirrer จึงหยุดทำงานด้วย

3. การออกแบบตัวเครื่อง ได้ออกแบบคล้ายคลึงกับเครื่อง BUCHLER chloridometer(รูปที่ 5) เนื่องจากเป็นแบบที่มีโครงสร้างง่าย ๆ แต่การวิจัยครั้งนี้ได้มีการปรับปรุงบางส่วนให้ดีขึ้น ส่วนประกอบของเครื่องต้นแบบมีดังนี้

3.1 Sensing electrode และ generating electrode ทำจากเงินบริสุทธิ์ที่จ้างให้ร้านรับจ้างทำเงินทองรูปพรรณรีดให้ ทำให้มีราคาถูก

3.2 Stirrer ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม(stainless steel)

3.3 Holder ทำจากโลหะพ่นสีกันสนิม ใช้สำหรับวาง vial สำหรับไทเทรต

3.4 สวิตช์เลือกช่วงการไทเทรต(range switch) ใช้ตำแหน่ง High เมื่อใช้ตัวอย่าง 100 ไมโครลิตร ใช้ตำแหน่ง Low เมื่อใช้ตัวอย่าง 10 ไมโครลิตร

3.5 สวิตช์ควบคุมการไทเทรต ตำแหน่ง Auto หมายถึงการไทเทรตจะทำโดยอัตโนมัติ เมื่อยก holder ขึ้นสุด ตำแหน่ง Standby หมายถึง การไทเทรตจะเริ่มขึ้นเมื่อยก holder ขึ้นสุด และกดปุ่ม Start

3.6 สวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้า(power switch) ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องมือ(ตำแหน่ง ON) และงดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องมือ(ตำแหน่ง OFF)

4. การตรวจวัดคลอไรด์ไอออน

4.1 การไทเทรตแบบลบค่า blank เอง(manual blank correction) มีวิธีการดังนี้

4.1.1 ตั้ง range switch ไปที่ตำแหน่ง High ถ้าใช้ตัวอย่าง 100 ไมโครลิตร และโยกสวิตช์ไปที่ Low ในกรณีที่ใช้ตัวอย่าง 20 ไมโครลิตร

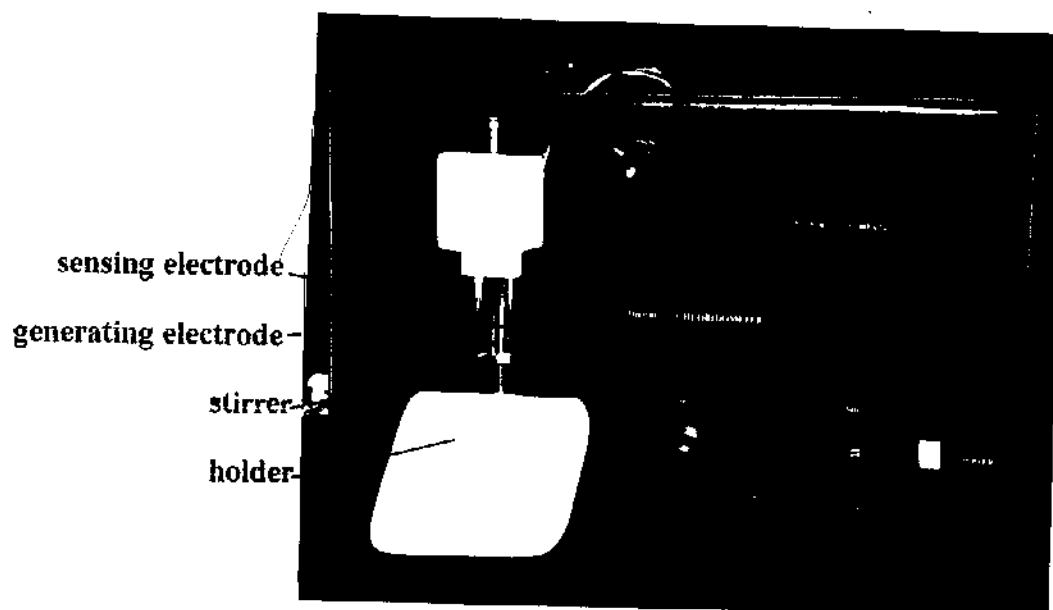
4.1.2 วาง vial ซึ่งบรรจุ acid reagent จำนวน 8 มล. และ gelatin indicator 8 หยด ไว้บน holder

4.1.3 เลื่อน holder ขึ้นจนสุด เครื่องจะไทเทรตโดยอัตโนมัติ

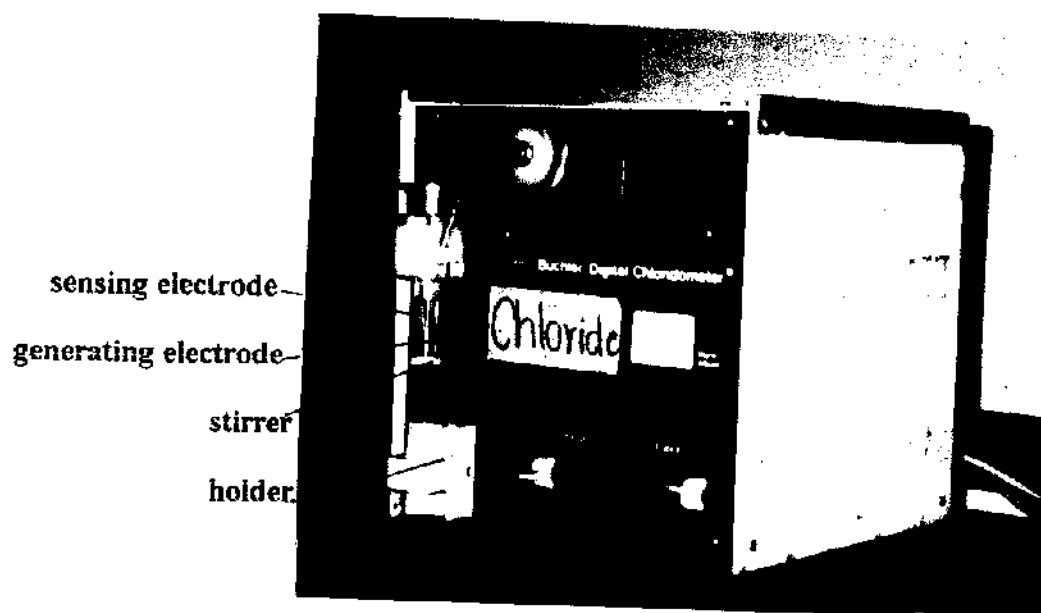
4.1.4 อ่านค่า blank เมื่อตัวเลขที่ display window หยุดนิ่ง

4.1.5 เลื่อน holder ลง ล้างอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ซับให้แห้งด้วยผ้าก๊อซ

4.1.6 หาค่า blank ใหม่ 3 ครั้ง โดยใช้ vial ใหม่ทุกครั้ง



ก



ข

รูปที่ 5 รูปภาพภายนอกของเครื่องต้นแบบ(ก) และเครื่องเดิม(ข)

4.1.7 หาค่าคลอไรด์ในตัวอย่างด้วยวิธีการเดียวกับการหาค่า blank

4.1.8 หาค่าจริงของ ตัวอย่าง โดยการเอาค่า blank มาลบออกจากค่าที่อ่านได้ในข้อ 4.1.7

4.2 การไทเทรตแบบลบค่า blank โดยอัตโนมัติ(automatic blank correction) มีขั้นตอนดังนี้

4.2.1 วาง vial ซึ่งมี acid reagent 8 มล. และ gelatin indicator 8 หยด บน holder

4.2.2 ทำการไทเทรตค่า blank โดยเลื่อน holder ขึ้นจนสุด และอ่านค่าที่ display window ขณะที่หยุดการไทเทรตแล้ว

4.2.3 เติมตัวอย่างหรือสารมาตรฐาน 100 หรือ 10 ไมโครลิตร ลงใน vial เติม ทำการไทเทรตใหม่

4.2.4 ค่าที่ display window จะเป็นค่าจริงที่หักค่า blank ออกแล้ว ซึ่งการไทเทรต โดยวิธีนี้สามารถตรวจวัดคลอไรด์ติดต่อกัน ใน vial เดียวกัน ได้ประมาณ 15 ถึง 20 ครั้ง

5. การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ

5.1 การทดสอบคุณภาพของลวดเงิน ทดสอบโดยใช้ลวดเงินที่ห้างร้าน ทำทองเงินรูปพรรณรีด และลวดเงินที่ซื้อจากบริษัทผู้ผลิตเครื่อง chloridometer กับเครื่องต้นแบบแล้วตรวจวัดค่าคลอไรด์ ไอออน ในซีรัมผู้ป่วยจำนวน 20 ราย

5.2 การทดสอบความแม่นยำ(accuracy) ของการตรวจวัด ทดสอบด้วย 2 วิธีการคือ

5.2.1 การหาเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืน(percent recovery) ศึกษาโดยการเติมสารละลายมาตรฐานคลอไรด์ความเข้มข้น 100 mmol/l ปริมาณต่าง ๆ ลงในซีรัมรวม(pooled serum) ที่มีคลอไรด์ 98 mmol/l

5.2.2 การตรวจวัด commercial control serum ที่ทราบค่าคลอไรด์แล้วซ้ำกัน 5 ครั้ง

5.3 การทดสอบความเที่ยง(precision) ของการตรวจวัด ศึกษาโดยทำการตรวจวัดคลอไรด์ในซีรัมรวม และสารละลายคลอไรด์มาตรฐาน ค่าต่าง ๆ ซ้ำ ๆ กัน 20 ครั้ง

5.4 การทดสอบช่วงการวัด(measuring range) ศึกษาโดยเจือจางสารละลายคลอไรด์มาตรฐาน ให้มีความเข้มข้น 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100, 80, 20, 15, 10, 6, 4, 2, 1 และ 0 mmol/l แล้วนำค่าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบกันระหว่างเครื่องต้นแบบและเครื่องเดิม

ผลการทดลอง

จากการทดลองปรับปรุงวงจรและโครงสร้างของเครื่องต้นแบบ ปรากฏว่า ได้เครื่องต้นแบบที่มีลักษณะคล้ายเครื่อง BUCHLER chloridometer ดังรูปที่ 5 แต่ได้ใช้สายพานหมุน stirrer แทนระบบลูกกลิ้งสัมผัสในเครื่องเดิม ซึ่งเมื่อใช้งานไปนาน ๆ ลูกยางจะสึก ทำให้การหมุนของ stirrer ไม่คงที่ หรือไม่หมุนเลย และจากการเปรียบเทียบผลการตรวจวัด โดยใช้ขวดเงินจากร้านรับทำทอง เงินรูปพรรณ และจากผู้จำหน่ายเครื่อง chloridometer ปรากฏว่าได้ค่าเฉลี่ย 104.25 mmol/l และ 103.55 mmol/l ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการศึกษาความแม่นยำปรากฏว่าเครื่องต้นแบบ และเครื่องเดิม (BUCHLER chloridometer) มีเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนเท่ากับ 96.95 และ 96.72 ตามลำดับ (ตารางที่ 2 และตารางที่ 3) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และทั้งสองเครื่องให้ค่าการตรวจวัดคลอไรด์อยู่ในช่วงของค่าที่กำหนด (assigned value) ของซีรัมควบคุม (ตารางที่ 4)

จากการศึกษาความเที่ยงเมื่อตรวจวัดคลอไรด์ในซีรัมรวม 20 ครั้งปรากฏว่า ทั้ง 2 เครื่องมีความเที่ยงดีมาก ($\%CV = 1.76$ และ 1.19) (ตารางที่ 5) ผลการศึกษาคความเที่ยงในสารละลายคลอไรด์มาตรฐานความเข้มข้น 50, 100 และ 500 mmol/l ปรากฏว่าเครื่องต้นแบบมี $\%CV = 1.38, 1.18$ และ 0.37 ตามลำดับ ส่วนเครื่องเดิมมี $\%CV = 1.57, 0.90$ และ 0.25 ตามลำดับ (ตารางที่ 6) และเมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติปรากฏว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 7 และรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบ และเครื่องเดิมมี upper detection limit และ lower detection limit ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้น ประมาณ 700 mmol/l และ 2 mmol/l ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการตรวจวัดคลอไรด์ โดยใช้ลวคเงิน 2 ชนิดด้วยเครื่องค้นแบบ

ลำดับที่	จากบริษัท ฯ (mmol/l)	จากร้านทำทองเงินรูปพรรณ(mmол/l)
1	105	106
2	110	109
3	104	106
4	103	103
5	93	94
6	102	104
7	114	117
8	112	115
9	109	107
10	98	96
11	95	97
12	110	112
13	99	99
14	102	102
15	109	110
16	89	87
17	114	114
18	96	99
19	107	107
20	100	101
$\bar{x}$	103.55	104.25

ตารางที่ 2 ผลการหาเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของเครื่องค้นแบบ

serum (ml.)	water (ml.)	std. (ml)	chloride conc. (mmol/l)	expect. val. (mmol/l)	meas. val. (mmol/l)	std. recov. (mmol/l)	% expect.	%recov.
1	1.0	-	-	-	49.00	-	-	-
1	0.8	0.2	20.00	69.00	68.50	19.50	99.27	97.50
1	0.6	0.4	40.00	89.00	87.00	38.00	97.75	95.00
1	0.4	0.6	60.00	109.00	107.00	58.00	98.16	96.67
1	0.2	0.8	80.00	129.00	128.00	79.00	99.25	98.75
1	0.1	0.9	90.00	139.00	137.00	88.00	98.56	97.75
1	-	1.0	100.00	149.00	145.00	96.00	97.32	96.00
						$\bar{x}$	98.38	96.94

ตารางที่ 3 ผลการหาเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของเครื่องเดิม

serum (ml.)	water (ml.)	std. (ml.)	chloride conc. (mmol/l)	expect. val. (mmol/l)	meas. val. (mmol/l)	std. recov. (mmol/l)	%expect.	%recov
1	-	-	-	-	49.00	-	-	-
1	0.8	0.2	20.00	69.00	68.00	19.00	98.55	95.00
1	0.6	0.4	40.00	89.00	88.00	39.00	97.50	97.50
1	0.4	0.6	60.00	109.00	107.00	58.00	98.16	96.67
1	0.2	0.8	80.00	129.00	127.00	78.00	98.45	97.50
1	0.1	0.9	90.00	139.00	136.00	87.00	97.80	96.67
1	-	1.0	100.00	149.00	146.00	97.00	97.99	97.00
						$\bar{x}$	98.08	96.72

ตารางที่ 4 ผลการตรวจวัดคอโรลไอออน ใน commercial control serum(n=5)

control serum	assigned value(mmol/l)	measured value(mmol/l)	
		เครื่องต้นแบบ	เครื่องเดิม
Monitrol ES level I	96-118	105.40	105.20
Monitrol ES level II	79-96	88.80	90.20
Pathonorm H	121	122.80	120.20
Pathonorm L	82	81.40	82.80
Autonorm	100	102.40	101.60

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบความเที่ยงของการตรวจวัดคลอไรด์ ในซีรัมรวม

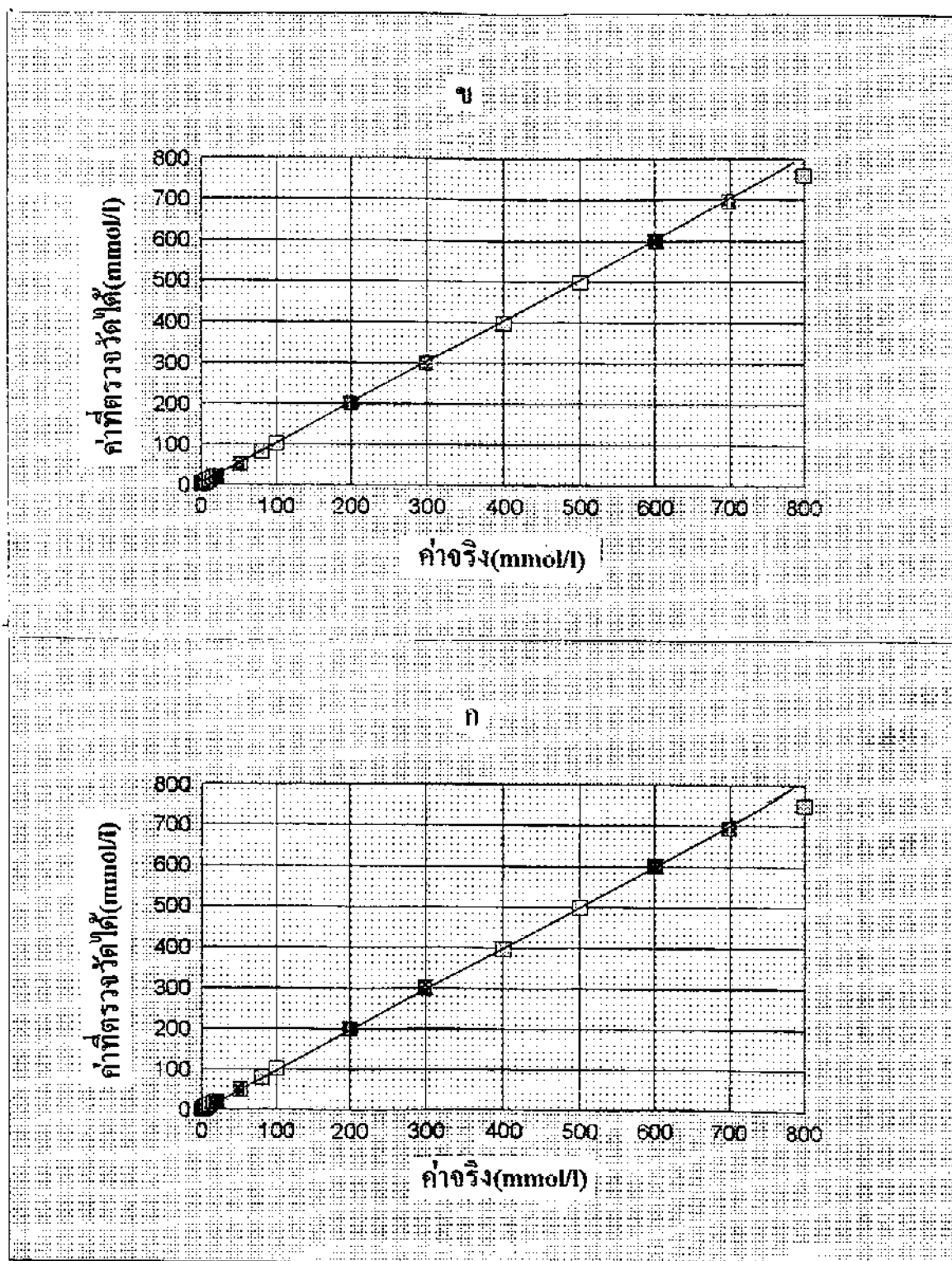
ลำดับที่	เครื่องต้นแบบ(mmol/l)	เครื่องเดิม(mmol/l)
1	102	105
2	106	104
3	106	105
4	104	105
5	103	104
6	108	107
7	104	103
8	107	107
9	108	105
10	103	104
11	103	103
12	104	106
13	104	106
14	106	107
15	107	104
16	106	103
17	102	105
18	104	105
19	104	105
20	105	105
$\bar{x}$	104.80	104.90
SD	1.85(%CV=1.76)	1.25(%CV=1.19)

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความเที่ยงของการตรวจวัดกลูโคสในสารละลายมาตรฐาน

ลำดับที่	ความเข้มข้น 50 mmol/l		ความเข้มข้น 100 mmol/l		ความเข้มข้น 500 mmol/l	
	เครื่องต้นแบบ	เครื่องเดิม	เครื่องต้นแบบ	เครื่องเดิม	เครื่องต้นแบบ	เครื่องเดิม
1	50	49	102	101	498	499
2	49	50	101	102	499	500
3	50	51	103	102	496	496
4	51	50	100	102	499	500
5	50	51	101	100	500	500
6	49	49	101	101	501	500
7	50	51	102	102	500	499
8	49	50	103	100	496	496
9	51	51	102	101	502	500
10	50	49	101	101	500	499
11	50	49	100	102	498	498
12	51	50	103	101	496	497
13	50	51	102	102	497	498
14	50	51	104	103	499	500
15	49	50	102	101	496	500
16	50	50	100	100	497	499
17	50	51	101	102	498	499
18	51	51	100	100	499	497
19	51	51	103	102	496	498
20	51	50	102	100	499	500
$\bar{x}$	50.16	50.25	101.6	101.25	498.26	498.85
$SD(\%CV)$	0.69(1.38)	0.79(1.57)	1.20(1.18)	0.91(0.90)	1.85(0.37)	1.23(0.25)

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบช่วงการวัดของเครื่องต้นแบบและเครื่องเดิม ใบสารละลาย
กลอไรด์มาตรฐาน

ลำดับที่	ความเข้มข้นจริง (mmol/l)	ค่าที่วัดได้(mmol/l)	
		เครื่องต้นแบบ	เครื่องเดิม
1	800	750	760
2	700	695	697
3	600	602	600
4	500	498	497
5	400	396	397
6	300	300	299
7	200	199	201
8	100	101	102
9	80	79	81
10	50	49	50
11	20	19	20
12	15	16	16
13	10	11	11
14	6	7	7
15	4	5	4
16	2	2	2
17	1	0	0
18	0	0	0



รูปที่ 6 กราฟแสดงช่วงการวัดของเครื่องคั่นแบบ(ก) และเครื่องเค็ม(ข)

จากการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกลูโคสในซีรัมผู้ป่วย 50 ราย ปรากฏว่าเครื่องต้นแบบให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.92 mmol/l ส่วนเครื่องเดิมให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.62 mmol/l (ตารางที่ 8) ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p > 0.05$) และค่าการตรวจวัดมีความสัมพันธ์กันดีมาก($r = 0.9993$, $y = 1.0055x - 0.1655$) (ตารางที่ 9 และรูปที่ 7)

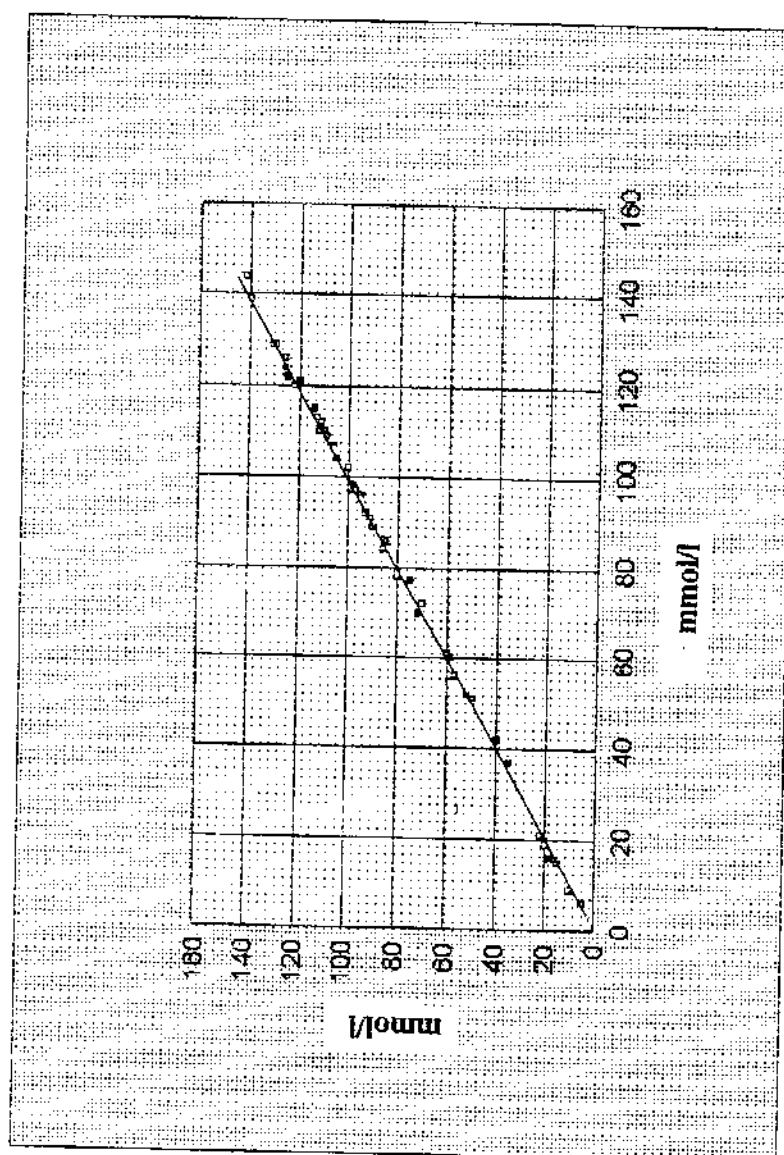


ตารางที่ 8 เปรียบเทียบผลการตรวจวัดในซีรัมผู้ป่วย 50 ราย

ลำดับที่	เครื่องคำนวณแบบ (mmol/l)	เครื่องเดิม (mmol/l)	ลำดับที่	เครื่องคำนวณแบบ (mmol/l)	เครื่องเดิม (mmol/l)
1	5	6	26	97	97
2	10	9	27	98	98
3	15	15	28	99	98
4	18	16	29	99	97
5	20	20	30	99	98
6	20	19	31	100	102
7	22	21	32	105	104
8	35	37	33	106	107
9	40	42	34	109	109
10	50	51	35	110	110
11	52	52	36	110	110
12	57	56	37	111	112
13	59	60	38	112	110
14	60	61	39	113	113
15	70	72	40	114	115
16	72	70	41	120	121
17	75	77	42	122	120
18	80	79	43	122	120
19	80	78	44	125	122
20	85	86	45	126	124
21	86	84	46	126	126
22	90	89	47	130	129
23	91	91	48	131	129
24	93	92	49	140	139
25	95	96	50	142	144

ตารางที่ 9 สรุปผลการตรวจวัดคลอไรด์ในซีรัมผู้ป่วยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องต้นแบบ
และเครื่องเดิม

	เครื่องต้นแบบ	เครื่องเดิม
$\bar{x}(\text{mmol/l})$	84.92	84.62
n	50	
correlation coefficient(r)	0.9993	
regression equation	$y = 1.0055 x - 0.1655$	
minimum value(mmol/l)	5	
maximum value(mmol/l)	142	



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคลอไรด์ระหว่างเครื่องต้นแบบ(y) และเครื่องเดิม(x)

จากการทดลองสร้างเครื่องตรวจวัดคลอไรด์แบบจำนวน 1 เครื่อง(รูปที่ 5) โดยการใช้วงจรง่าย ๆ มาถือเป็นวงจรเพื่อให้เครื่องสามารถตรวจวัดคลอไรด์ได้ และทำการทดสอบประสิทธิภาพและคุณภาพในการตรวจวัดพบว่า

1. เครื่องต้นแบบไม่มีความแตกต่างจากเครื่องเดิม(BUCHLER chloridometer) ทั้งในด้าน ความเที่ยง(precision) ความแม่นยำ(accuracy) และช่วงการวัด(analytical range) และให้ค่าการตรวจวัดที่มีความสัมพันธ์กันดีมาก($r = 0.993$)
2. เครื่องต้นแบบมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าเครื่องเดิมอย่างน้อย 20 เท่า เนื่องจากใช้วงจรง่าย ๆ และตัดวงจรบางส่วนออก เช่นวงจร automatic blank correction ซึ่งไม่มีความจำเป็นมากนักเนื่องจากเครื่องต้นแบบสามารถไทเทรตแบบ automatic blank correction ได้ ให้ผลการตรวจวัดอยู่ในเกณฑ์ดี และสามารถไทเทรตใน vial เดิมติดต่อกันได้อย่างน้อย 15 ครั้ง
3. เครื่องต้นแบบสามารถซ่อมแซม และบำรุงรักษาได้ง่ายกว่า เนื่องจากองค์ประกอบมีน้อยชิ้น และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ หาได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป
4. เครื่องต้นแบบได้การปรับปรุงส่วนควบคุมการหมุนของ stirrer ซึ่งเดิมใช้ระบบลูกยางสัมผัสหมุน มาเป็นการใช้สายพาน ทำให้ stirrer มีความแน่นอนในการหมุนมากกว่า

ถึงแม้ว่าเครื่องต้นแบบจะมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดีก็ตาม แต่เนื่องจากงบประมาณที่สนับสนุน โครงการวิจัยนี้มีจำกัดทำให้เครื่องต้นแบบยังไม่มีความสมบูรณ์ครบถ้วน คณะผู้วิจัยคิดว่าจะมีการปรับปรุงบางส่วนอีกเล็กน้อย ทั้งในด้านขนาด ความสวยงาม ความสะดวกในการใช้