บทที่ 2
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการ ลดควันในท่อไอเสีย ที่เป็นมลภาวะอากาศจากยานยนต์ ซึ่งจะกล่าวถึงที่มาของควันและสถานการณ์ของมลภาวะอากาศรวมถึงการออกแบบการทดลองที่ถูกต้องตามหลักการทางวิศวกร**รม** ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟคเทอเรียล และการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์**ผล** ทางสถิติ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลที่ถูกต้อง

2.1 มลภาวะอากาศเนื่องจากยานยนต์

(ที่มา: วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, นิตยา มหาผล และ ธีระ เกรอต,2536.)

ยานยนต์เป็นตัวกำเนิดของมลสารในอากาศที่สำคัญในบริเวณชุมชนหนาแน่นในกรุงเทพฯ การจราจรเป็นต้นกำเนิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรคาร์บอนในปริมาณมากกว่าแหล่งกำเนิดอื่นๆ ซึ่งจะทำให้เกิดผลเสียทางสุขภาพของประชากร และสิ่งแวดล้อมรอบตัวเรา

ในกรุงเทพมหานคร ไอเสียจากรถยนต์ รถจักรยานต์ยนต์ ทำให้เกิดมลภาวะอากาศโดยทั่วไป และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น

2.1.1 การทำงานของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์สันดาปภายใน เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไป มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในตัวเครื่องยนต์ ส่วนเครื่องยนต์สันดาปภายนอก ยกตัวอย่างได้แก่ เครื่องจักรไอน้ำ ซึ่งใช้พลังงานไอน้ำที่ได้จากหม้อไอน้ำที่อยู่นอกเครื่องยนต์

เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบเคลื่อนแนวตรง ทำงานแบบวงจร 4 จังหวะหรือวงจร 2 จังหวะ เครื่องยนต์แบบวงจร 4 จังหวะใช้ทั่วไปในรถยนต์และยานพาหนะทางบกอื่น ๆ และเรือยนต์ เครื่องยนต์แบบ 4 จังหวะ และ 2 จังหวะ มีขบวนการ 4 ขั้นตอนในการทำงานซึ่งระเบิดส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ ให้เกิดพลังงานความร้อน แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานขับเคลื่อนลูกสูบ ขบวนการ 4 **ขั้นตอนคือ ดูดไอดี อัดส่วนผสม ถ่ายทอดกำลัง และปล่อยไอเสียเกิดขึ้นหมุนเวียนตลอดเวลาที่เครื่องยนต์ทำงาน**

2.1.1.1 การทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

1. ลูกสูบเคลื่อนลง ลิ้นไอดีเปิด ดูดส่วนผสมอากาศ และเชื้อเพลิงเข้าแทนที่ช่องว่าง ส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงนี้ถูกเตรียมโดยคาร์บูเรเตอร์ ให้มีส่วนผสมที่เหมาะแก่การเผาไหม้ คือ ประมาณ 14.5: 1 โดยน้ำหนัก

2. เมื่อลูกสูบลงสุดแล้ว ลิ้นไอดีปิด แรงจากเพลาจะดันลูกสูบขึ้นอัดส่วนผสมอากาศ และเชื้อเพลิง หัวเทียนจะจุดระเบิดด้วยประกายไฟ เมื่อลูกสูบขึ้นเกือบสูงสุด อัตราส่วนของปริมาตรส่วนผสมที่จุดนี้ เทียบกับปริมาตรเมื่อลูกสูบลงต่ำสุด เรียกว่าอัตราส่วนแรงอัด อัตราส่วนแรงอัดนี้โดยปกติจะประมาณ 8.5: 1 ถึง 10:1

3. จังหวะถ่ายทอดกำลังเริ่มเมื่อส่วนผสมเผาไหม้ อุณหภูมิจะสูงขึ้นถึงประมาณ 2,500-3,000 องศาเซลเซียส ก๊าซเกิดแรงดันให้ลูกสูบเคลื่อนลงขับเคลื่อนเพลา

4. เมื่อลูกสูบเคลื่อนลงจนสุด ลิ้นไอเสียเปิดปล่อยให้ไอเสียถูกดันออกในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนขึ้นด้วยแรงเหวี่ยงของเพลา จนลูกสูบเคลื่อนขึ้นบนสุด ลิ้นไอเสียปิดพร้อมที่จะเริ่มวงจรใหม่

2.1.1.2 การทำงานของเครื่องยนต์ 2 จังหวะ

เครื่องยนต์วงจร 2 จังหวะ ลูกสูบเคลื่อนขึ้นลงเพียง 2 ครั้งหรือ 1 รอบต่อวงจร เมื่อลูกสูบเคลื่อนลงเกือบสุด ลิ้นไอเสียเปิดปล่อยให้ไอเสียภายใต้ความดันสูงระบายออก เมื่อลูกสูบเคลื่อนลงต่อไปอีกจะเปิดลิ้นไอดี ปล่อยให้ส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงไหลเข้าในกระบอกสูบ ไอดีบางส่วนจะไหลออกทางท่อไอเสียในช่วงสุดท้ายก่อนที่ลิ้นไอเสียจะปิด ทำให้ไอเสียประกอบด้วยส่วนผสมอากาศ และเชื้อเพลิง มีไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก

เครื่องยนต์ที่มีการทำงานแบบ 2 จังหวะ จะมีวัฏจักรการทำงานคือจังหวะดูด จังหวะอัด จังหวะระเบิด และจังหวะคาย เช่นเดียวกับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ แต่จังหวะดูดกับจังหวะอัดจะเกิดขึ้นพร้อมกันและจังหวะระเบิดกับจังหวะคายเกิดขึ้นพร้อมกัน ทำให้จังหวะในการทำงานเหลือเพียง 2 จังหวะ

2.2 ที่มาของมลสารในอากาศจากยานยนต์

(ที่มา: วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, นิตยา มหาผล และ ธีระ เกรอต,2536.)

การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ทำให้เกิดมลสารในอากาศผลจากการสันดาปที่สมบูรณ์ได้แก่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำส่วนการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์จะให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจารการเผาไหม้ นอกจากนี้ในน้ำมันยังมีสารเจือปนที่สำคัญ คือ ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ซึ่งทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ กลายเป็นก๊าซซัลเฟอร์ได

ออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ยังเกิดได้จากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงของห้องสันดาป สารเจือปนในน้ำมันที่สำคัญอีกอย่าง คือ ตะกั่วจะถูกปล่อยออกมากับไอเสีย

ที่พบในอากาศเมืองทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศกล่าวกันว่ามาจากไอเสียรถยนต์ ขณะนี้ในไทยยังไม่มีรายงานเก็บสถิติผู้ได้รับผลกระทบต่อสุขภาพจากก๊าซนี้ แต่ในอเมริกา แคนาดา และอังกฤษ ได้มีรายงานว่าอัตราการเข้ารักษาตัวในรพ.เนื่องจากโรคหลอดเลือดหัวใจจะเปลี่ยนแปลง 10-37% ต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ 10 ไมโครกรัม/ลบ.ม.

มลพิษทางอากาศกับชุมชนเมือง มักจะเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงได้ยาก โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ๆ ที่มีการจราจรคับคั่งมลพิษทางอากาศมีแหล่งที่มาจากการปลดปล่อยแก๊สพิษจากรถยนต์ จักรยานยนต์และโรงงานอุตสาหกรรมโดยปกติการสันดาปของเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลที่สมบูรณ์จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพน้อยมาก แต่เมื่อประสิทธิภาพ ของเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลลดลง เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้แก๊สพิษปลดปล่อย ออกมาทางท่อไอเสีย ก๊าซพิษที่กล่าวถึงนี้ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน ไนโตรเจนออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชน ถ้าสูดดมเข้าไปเป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่มีพิษร้ายแรงมาก เมื่อได้รับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณเพียง 10 ส่วนในอากาศล้านส่วน (10 ppm.) จะมีผลต่อระบบประสาท ทำให้เกิดอาการอ่อนเพลีย มึนงง ตาพร่ามัว และคลื่นไส้อาเจียนได้ และถ้าได้รับเข้าไปในปริมาณมากถึง 0.002 เปอร์เซ็นต์ เพียง 30 นาที อาจถึงขั้นเสียชีวิตได้

2.2.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและรส มีน้ำหนักเบากว่าอากาศเพียงเล็กน้อย ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา สามารถอยู่ในอากาศได้นาน 1-2 เดือน แต่มีความสามารถพิเศษ ในการรวมตัวกับ ฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง ได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจนถึง 200-250 เท่า ทำให้การลำเลียงออกซิเจน ไปสู่เซลล์ต่างๆ ของร่างกายได้น้อยลง ร่างกายอ่อนเพลีย และเสียชีวิตได้ เมื่อเกิดภาวะขาดออกซิเจนเฉียบพลัน จากผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้น

สาเหตุการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

1. มีการปรับแต่งเครื่องยนต์เกี่ยวกับระบบจ่ายไฟ และจ่ายน้ำมันที่ไม่เหมาะสม
2. ไส้กรองอากาศอุดตัน
3. ใช้น้ำมันผิดประเภท เช่น ใช้น้ำมันธรรมดากับเครื่องยนต์ที่กำหนด ให้ใช้น้ำมันเบนซินพิเศษ

4. บรรทุกน้ำหนักเกินอัตราที่กำหนด

5. ลักษณะการขับขี่ที่มีการเร่งเครื่องยนต์โดยไม่จำเป็น

2.2.2 สถานการณ์ในประเทศไทยและต่างประเทศ

การควบคุมไอเสียจากรถยนต์เริ่มที่รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา เนื่องจากมีปัญหาจากโฟโตเคมิคัลสม็อก แล้วจึงเผยแพร่ไปทั่วประเทศ และนานาประเทศ ในปัจจุบันสหรัฐอเมริกายังคงเป็นผู้นำในด้านมาตรการควบคุมไอเสียรถยนต์ที่เข้มงวด ประเทศไทยเองมีโอกาสศึกษามาตรการควบคุมไอเสียของต่างประเทศ แล้วนำดัดแปลงให้เหมาะสมกับสภาพของเมืองไทย

2.2.2.1 การควบคุมไอเสียรถยนต์ในสหรัฐอเมริกา

การควบคุมไอเสียจากรถยนต์เริ่มที่รัฐแคลิฟอร์เนีย โดยให้รถยนต์จดทะเบียนปีค.ศ.1961 ต้องมีการควบคุมไอเสียจากเสื้อสูบ ในปีค.ศ.1963 รถใหม่ทุกคันในประเทศสหรัฐอเมริกามีเครื่องควบคุมดังกล่าว รัฐบาลกลางกำหนดมาตรฐานควบคุมไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียจากเสื้อสูบในปี ค.ศ.1968 ในปี ค.ศ.1970 รัฐบาลมีมาตรฐานเข้มงวดมากขึ้น นอกจากนี้ยังควบคุมไอเสียจากรถบรรทุก และรถโดยสาร ซึ่งมีมาตรฐานควบคุมควันดำจากรถที่ใช้น้ำมันดีเซล มาตรการควบคุมไนโตรเจนออกไซด์บังคับใช้ทั่วไปในประเทศในปี ค.ศ.1973 และมีแนวโน้มที่จะลดปริมาณไอเสียให้น้อยลงในอนาคต ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี

บริษัทผลิตรถยนต์และหน่วยงานของรัฐ จะทำการตรวจสอบรถยนต์และเครื่องยนต์ใหม่ให้ถูกต้องตามมาตรฐานไอเสีย โดยวิธีการทดสอบแบบเร่งอายุซึ่งทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของไอเสียตลอดอายุของเครื่องยนต์(100,000 ไมล์) และในวิธีการทดลองยอมให้มีการเสื่อมของเครื่องมือควบคุมตามอายุการใช้งาน แล้ววัดไอเสียเมื่อขับรถยนต์ตาม วัฏจักรการทดสอบ (Test cycle) ซึ่งเลียนแบบค่าเฉลี่ยการขับขี่รถยนต์ตามท้องถนน แต่การทดสอบทำบนแท่นลูกกลิ้ง (Dynamometer) ในขณะที่มีการวัดค่าไอเสียตลอดเวลา ความคงทนของเครื่องมือควบคุมทำโดยขับรถยนต์ 50,000 ไมล์ และวัดไอเสียอย่างน้อยทุกระยะ 4,000 ไมล์

2.2.2.2 การควบคุมไอเสียรถยนต์ในประเทศไทย

งานควบคุมไอเสียรถยนต์ในประเทศไทยอยู่ในระยะเริ่มแรกสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (สวล.) ได้สำรวจตรวจวัดอากาศเสียในเขตต่างๆ ข่องกรุงเทพฯ เพื่อดูสถานการณ์มลภาวะทางอากาศ ขณะเดียวกันสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ได้ร่วมกับเจ้าพนักงานจราจรตรวจวัดอากาศเสียจากรถยนต์ตามจุดต่างๆในระหว่างเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม 2522 รวมทั้งหมด 8 จุด โดยสุ่มตัวอย่างรถยนต์ และวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากท่อไอเสียในขณะที่เดินเครื่องยนต์เบาให้เกียร์ว่าง ได้ผลสรุปว่ารถยนต์ที่มี

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่า 6% มีถึง54% นอกจากนี้ยังพบด้วยว่าอายุการใช้งาน ความเร็วรอบและขนาดของเครื่องยนต์ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ในด้านนโยบายควบคุม สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ มีคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมเรื่องอากาศและเสียงซึ่งพิจารณามาตรฐานค่าควันดำ และค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ยินยอมให้ระบายออกจากท่อไอเสียของรถยนต์ได้ ในมาตรฐานซึ่งประกาศใช้ในปี พ.ศ. 2522 ได้กำหนดให้ "ค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของรถยนต์ที่เดินด้วยกำลังเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินต้องไม่เกินร้อยละหก" และ "ค่าควันดำของรถยนต์ที่เดินด้วยกำลังเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลต้องไม่เกินร้อยละสี่สิบของเครื่องวัดระบบวอซ"

มาตรฐานควบคุมไอเสียรถยนต์ของประเทศไทยไม่เข้มงวดเท่ากับมาตรฐานของนานาประเทศ คาดว่าเป็นการผ่อนผันให้รถยนต์ที่ไม่ได้มาตรฐานซึ่งมีจำนวนเกินครึ่งได้มีโอกาสทำการปรับปรุงแก้ไขเครื่องยนต์ การปรับแต่งอัตราส่วนผสมอากาศ และน้ำมันนอกจากจะลดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เหลือเพียง 3.5% แล้วยังเป็นการประหยัดน้ำมันอีกด้วยเหตุผลข้อนี้น่าจะเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป ดังนั้นสิ่งต่อไปที่จะต้องทำคือพยายามให้มาตรฐานฉบับนี้บังคับใช้กันอย่างจริงจัง

ตารางที่ 2.1 จำนวนรถยนต์กับความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียรถยนต์กรุงเทพ ฯ

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	จำนวนรถยนต์		
	จำนวนคัน	%	% ความถี่สะสม
0-0.9	42	8.1	100
1-1.9	20	3.89	91.83
2-2.9	23	4.47	87.94
3-3.9	32	6.23	83.47
4-4.9	58	11.28	77.24
5-5.9	61	11.87	65.96
6-6.9	75	14.59	54.09
7-7.9	54	10.51	39.5
มากกว่า8	149	28.99	28.99
รวม	514	100	-

(ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ การสำรวจปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากรถยนต์ 18 กันยายน 2523)

2.2.2.3วัฏจักรการตรวจสอบของยุโรป (European Test Cycle)

วัฏจักรการตรวจสอบของยุโรปทำโดยติดเครื่องยนต์ทิ้งไว้ 13 นาที ก๊าซทั้งหมดที่ออกมาจากท่อไอเสียของรถยนต์จะถูกรวบรวมวัดปริมาตรไว้ และนำไปเป็นตัวอย่างวิเคราะห์ ในวิธีนี้สัดส่วนของส่วนผสมไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ ในไอเสียที่คำนวณตรวจวัดได้แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดให้ยอมได้

2.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคเทอเรียล

(ที่มา: ปรเมศ ชุติมา,2545.)

ในการออกแบบการทดลอง เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อการวิจัย พัฒนา ปรับปรุง ผลิตภัณฑ์ เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งการออกแบบการทดลองเป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของปัจจัย โดยปัจจัยคือสิ่งที่คาดว่าจะมีผลต่อสิ่งที่เราศึกษา เช่น การโฆษณาเป็นปัจจัยหนึ่งของการขายสินค้า โดยทำการศึกษาว่าหากปัจจัยมีการเพิ่มหรือลดลงจะมีผลต่อสิ่งที่เราศึกษาอย่างไร ซึ่งในการศึกษาหนึ่งๆ อาจมีปัจจัยที่มากกว่าหนึ่งปัจจัย ในการออกแบบการทดลองทั่วๆไป ซึ่งหากเป็นออกแบบการทดลองทีละปัจจัยนั้นสามารถจะทำการวิเคราะห์และสรุปผลได้ แต่การอกแบบการทดลองแบบทีละปัจจัยก็มีข้อจำกัด อันที่จะเป็นการที่ยุ่งยาก ซับซ้อนต่อวิธีการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปผล สำหรับการทดลองที่มีหลายๆ ปัจจัย ซึ่งจะทำให้ผลที่ออกมานั้นมีความน่าเชื่อถือได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น

ดังนั้นจึงทำให้มีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคเทอเรียล ซึ่งเป็นการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งการออกแบบเชิงแฟคเทอเรียล หมายถึง การพิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลิเคต (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main effect) เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในการทดลองตามรูปที่ ซึ่งเป็นการทดลองเชิงแฟคเทอเรียล 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับ “ต่ำ” และ “สูง” ซึ่งจะแทนระดับทั้งสองด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” ตามลำดับ ผลหลักของปัจจัย A ในการทดลองนี้คือผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัย A ซึ่งเขียนเป็นตัวเลขได้ว่า

$$A = (40+52)/2 - (20+30)/2 = 21$$

หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของปัจจัย A จากระดับต่ำไประดับสูงจะทำให้ผลตอบเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 21 หน่วย ในทำนองเดียวกัน จะสามารถคำนวณหาค่าผลหลักของปัจจัย B ได้คือ

$$B = (30+52)/2 - (20+40)/2 = 11$$

สำหรับกรณีที่มีปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย จะต้องมีการดัดแปลงวิธีการคำนวณบางประการ ในการทดลองบางอย่าง จะพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่น ๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึงว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ นั่นเอง และเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น พิจารณาการทดลองเชิงแฟคเทอเรียลของปัจจัย 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ผลของปัจจัย A ที่ปัจจัย B อยู่ระดับต่ำ (B^-) มีค่าเป็น

$$A = 50 - 20 = 30$$

และผลของปัจจัย A ที่ปัจจัย B อยู่ระดับสูง (B^+) มีค่าเป็น

$$A = 12 - 40 = -28$$

เนื่องจากผลของปัจจัย A ขึ้นกับระดับของปัจจัย B ที่ถูกเลือก ดังนั้นจะกล่าวได้ว่า ปัจจัย A และ B มีอันตรกิริยาต่อกัน ขนาดของอันตรกิริยาจะเทากับค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของผลของปัจจัย A ที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัย B ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$AB = (-28 - 30)/2 = -29$$

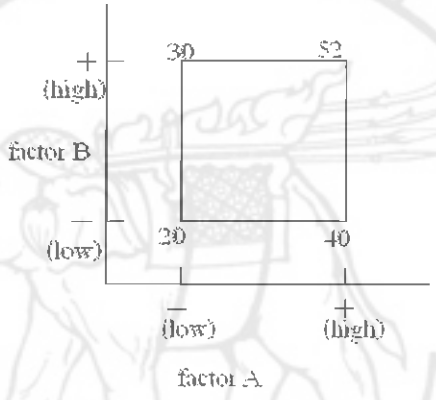
ซึ่งเห็นได้ว่า ค่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B ในที่นี้มีค่าสูง

แนวคิดดังกล่าวสามารถแสดงได้ด้วยกราฟ รูปที่ เป็นกราฟระหว่างผลตอบของปัจจัย A ที่ระดับทั้งสองของปัจจัย B จะเห็นว่าเส้นของ B^- และ B^+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้ จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 2.9 เป็นการพล็อตข้อมูลของรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้น B^- และ B^+ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่า ปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะนี้จงมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (significant) ของอันตรกิริยา

ตามหลักปกติ เมื่ออันตรกิริยามีค่าสูง ผลหลักจะมีความหมายน้อยมากในทางปฏิบัติ จากตัวอย่างในรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าผลหลักของปัจจัย A มีค่าเท่ากับ

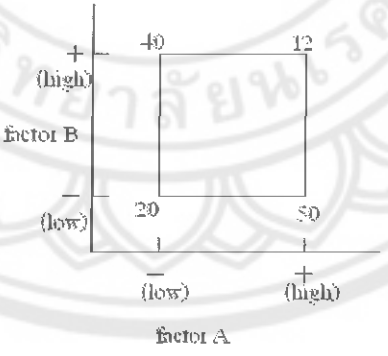
$$A = (50+12)/2 - (20+40)/2 = -1$$

ซึ่งมีค่าต่ำมาก และอาจทำให้สรุปได้ว่า ผลจากปัจจัย A นั้นไม่มีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงผลของปัจจัย A ที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัย B แล้วจะพบว่า ในความเป็นจริงแล้วปัจจัย A มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลของปัจจัย A นั้นจะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัย B



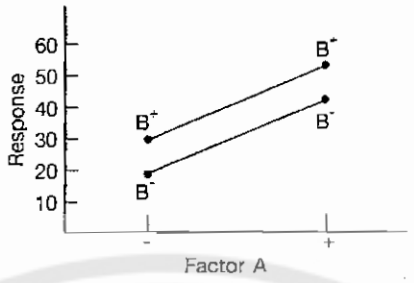
รูป 2.1 การออกแบบเชิงแฟคเทอเรียล 2 ปัจจัย

(ที่มา: ปรเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.)



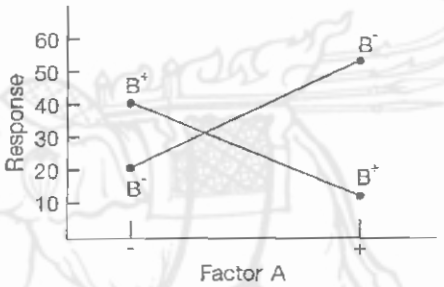
รูป 2.2 การออกแบบเชิงแฟคเทอเรียล 2 ปัจจัย (มีอันตรกิริยา)

(ที่มา: ปรเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.)



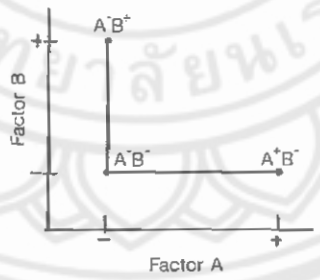
รูป 2.3 การออกแบบเชิงแฟคเทอเรียล (ไม่มีอันตรกิริยา)

(ที่มา: ปรเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.)



รูป 2.4 การออกแบบเชิงแฟคเทอเรียล (มีอันตรกิริยา)

(ที่มา: ปรเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.)



รูป 2.5 การทดลองแบบทีละปัจจัย (One-factor-at-a-time Experiment)

(ที่มา: ปรเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.)

2.3.1 การวิเคราะห์ผลจากค่าที่อ่านได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลจากค่าที่อ่านได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิตินั้น สามารถที่จะแสดงเป็นสูตรการหาค่าตามหลักของการออกแบบเชิงแฟคเทอเรียล ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบ Fixed Effect

Source	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	Expected Mean Square	F_0
A	SS_A	a – 1	Ms_A	$\sigma^2 + \frac{bcn\sum \tau_i^2}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	b – 1	Ms_B	$\sigma^2 + \frac{acn\sum \beta_j^2}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	c – 1	Ms_C	$\sigma^2 + \frac{abn\sum \gamma_k^2}{c-1}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	(a–1) (b–1)	Ms_{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn\sum\sum (\tau\beta)_{ik}^2}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	(a–1) (c–1)	Ms_{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn\sum\sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	(b–1) (c–1)	Ms_{BC}	$\sigma^2 + \frac{an\sum\sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	(a–1) (b–1) (c–1)	Ms_{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n\sum\sum\sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	Abc (n–1)	Ms_E	σ^2	
Total	SS_T	abcn - 1			

สำหรับค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองในตารางที่ 2.2 มีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{n} Y_{ijkl}^2 - \frac{\gamma_{...}^2}{abcn}$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้จากสูตรต่อไปนี้

$$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i=1}^{a}\gamma_{i...}^2 - \frac{\gamma_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{j=1}^{b}\gamma_{j...}^2 - \frac{\gamma_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{k=1}^{c}\gamma_{..k.}^2 - \frac{\gamma_{...}^2}{abcn}$$

เพื่อที่จะคำนวณค่าผลรวมของกำลังสองแบบ 2 ปัจจัยของอันตรกิริยา เราจะต้องสร้างตารางผลรวม ซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวน A x B, A x C และ B x C ขึ้นมา
จะได้ดังนี้ คือ

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} y_{ij..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$
$$= SS_{Subtotals(AB)} - SS_A - SS_B$$
$$SS_{AC} = \frac{1}{bn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{c} y_{i.k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C$$
$$= SS_{Subtotals(AC)} - SS_A - SS_C$$
$$SS_{BC} = \frac{1}{an}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} y_{.jk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$
$$= SS_{Subtotals(BC)} - SS_B - SS_C$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย หาได้จากสูตร

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$
$$= SS_{Subtotals(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดหาได้จากการลบผลรวมของกำลังสองทั้งหมดที่เกิดจากผลหลักและอันตรกิริยาจากผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotals(ABC)}$$

2.3.2. การแปลงรูปข้อมูลของจอห์นสัน (Johnson Transformation)

ในการเปลี่ยนรูปข้อมูลของจอห์นสันนั้น เพื่อเปลี่ยนรูปข้อมูลให้เป็นไปตามการแจกแจงแบบปกตินั้น จะเลือกฟังก์ชั่นใดฟังก์ชั่นหนึ่งที่เหมาะสมที่สุดจาก 3 ฟังก์ชั่น เพื่อเปลี่ยนรูปให้เป็นการแจกแจงปกติ การแจกแจงเหล่านี้ถูกจัดอยู่ใน SB, SL และ SU ซึ่ง B, L และ U จัดอยู่ในกลุ่มตัวแปรที่มีขอบเขตลอการิธึม และตัวแปรที่ไม่มีขอบเขต ฟังก์ชั่นการแจกแจงที่ได้เลือกถูกใช้เพื่อเปลี่ยนข้อมูลที่จะให้เป็นไปตามการแจกแจงตามปกตินั้น จะแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงสูตร Johnson Transformation

สมการ	ฟังก์ชั่นการเปลี่ยนรูปข้อมูลของจอห์นสัน	ระหว่างช่วง
SB	$\gamma + \eta \ln [(X - \varepsilon) / (\lambda + \varepsilon - X)]$	$\eta, \lambda > 0, -\infty<\gamma<\infty, -\infty<\varepsilon<\infty, \varepsilon < X < \varepsilon + \lambda$
SL	$\gamma + \eta \ln (X - \varepsilon)$	$\eta > 0, -\infty<\gamma<\infty, -\infty<\varepsilon<\infty, \varepsilon < X$
SU	$\gamma + \eta \text{ Sinh}^{-1} [(X - \varepsilon) / \lambda]$ where, $\text{Sinh}^{-1}(x) = \ln [x + \text{sqrt} (1 + x^2)]$	$\eta, \lambda > 0, -\infty<\gamma<\infty, -\infty<\varepsilon<\infty, -\infty< X <\infty$

วิธีพิจารณา

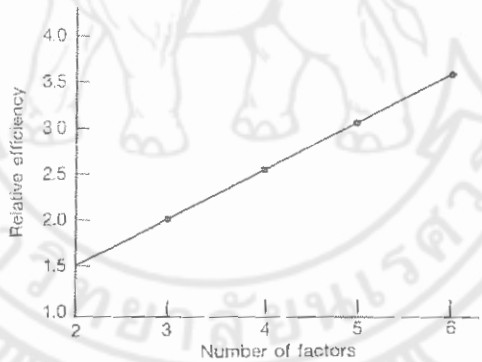
1. พิจารณาฟังก์ชั่นการเปลี่ยนรูปข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดของจอห์นสัน
2. ประมาณค่าตัวแปรในฟังก์ชันที่ใช้วิดังที่อธิบายในข้อ 5
3. เปลี่ยนรูปข้อมูลด้วยฟังก์ชันการเปลี่ยนสภาพ
4. คำนวณ Anderson-Darling และคำนวณค่า p-value ให้เหมือนกันสำหรับข้อมูลที่ได้มีการเปลี่ยนรูป
5. เลือกฟังก์ชั่นการเปลี่ยนรูปข้อมูลที่จะใช้สำหรับการเปลี่ยนรูปข้อมูลด้วยค่า p-value ที่มากที่สุด ซึ่งค่า p-value นั้นต้องมากกว่าค่า p-value ที่เป็นบรรทัดฐาน(ค่าพื้นฐานคือ 0.10) ซึ่งนอกจากกรณีนี้แล้ว จะเป็นการเปลี่ยนรูปข้อมูลที่ไม่ใช่สภาพที่เหมาะสม

2.3.3 ประโยชน์ของการออกแบบเชิงแฟคเทอเรียล

ประโยชน์ของการออกแบบเชิงแฟคเทอเรียลสามารถแสดงได้ดังนี้ สมมติว่าเรามี 2 ปัจจัย (A และ B) ที่ต้องการศึกษา แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งจะแทนปัจจัยแต่ละระดับด้วย A^-, A^+, B^-และ B^+ ตามลำดับ ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยทั้งสองสามารถหาได้จากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยทีละปัจจัยดังแสดงในรูป 2.10 ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัย A จากน้อยไปมากมีค่าเป็น $A^+B^- - A^-B^-$ และผลของการเปลี่ยนแปลงปัจจัย B จากน้อยไปมากคือ $A^-B^+ - A^-B^-$ เนื่องจากใน

การทดลองอาจจะมีความผิดพลาด (Error) ขึ้น ดังนั้นจึงทำการทดลองอย่างน้อย 2 ครั้ง สำหรับการทดลองร่วมปัจจัย (Treatment Combination) แต่ละจุด และนำผลตอบที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อประมาณถึงผลที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะต้องทำการทดลองทั้งสิ้น 6 ครั้ง (2 ครั้งจากA^+B^-, 2ครั้งจาก A^-B^-และ 2 ครั้งจาก A^-B^+)

ถ้าทำการทดลองแฟคเทอเรียล จะต้องทำการทดลองร่วมปัจจัย A^+B^+ เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งการทดลองในตอนนี้จะสามารถใช้เพียงแค่ 4 การทดลองเท่านั้นเพื่อหาผลที่เกิดจากปัจจัย A นั่นคือ A^+B^- -A^-B^- และ A^+B^+-A^-B^+ และผลที่เกิดจากปัจจัย A หาได้จากการนำค่าประมาณที่ได้ทั้งสองค่ามาเฉลี่ยและหาผลต่างของมัน ซึ่งก็คือ $(A^+B^-$-$A^-B^-)/2$-$(A^+B^+$-$A^-B^+)/2$ นั่นเอง และค่าผลที่เกิดจากปัจจัย A ที่ได้ควรจะมีค่าความถูกต้องใกล้เคียงกับการทดลองแบบทีละปัจจัย ในทำนองเดียวกันจากการทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ที่กล่าวมาก็จะสามารถหาผลที่เกิดจากปัจจัย Bได้เช่นกัน ดังนั้นประสิทธิภาพสัมพัทธ์ของการออกแบบเชิงแฟคเทอเรียลต่อการทดลองแบบทีละปัจจัยมีค่าเป็น 6/4=1.5 ซึ่งตามปกติแล้ว ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของปัจจัยเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6

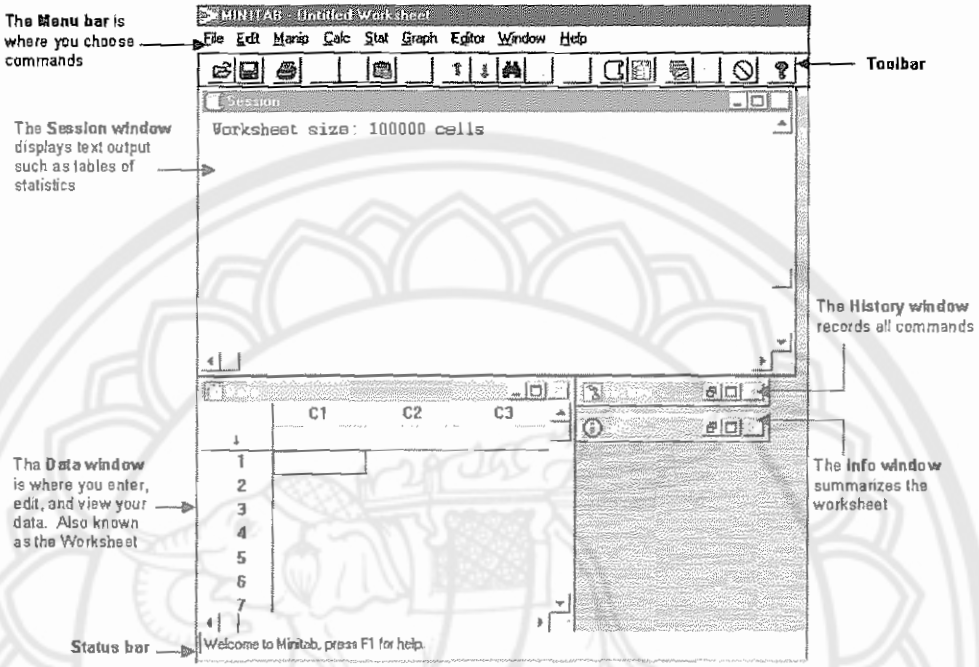


รูป 2.6 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ระหว่างการทดลองแบบแฟคเทอเรียลต่อการทดลองทีละปัจจัย
(ที่มา: ปรเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.)

2.4 โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ

เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ช่วยในการประมวลผลข้อมูลทางสถิติที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคการศึกษา และภาคอุตสาหกรรม ในด้านงานวิจัย งานวิจัย งานควบคุมคุณภาพ การออกแบบและการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือปรับปรุงการผลิตด้วยวิธีการของ Six Sigma หรือต้องการผลวิเคราะห์ที่แม่นยำ และด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ เป็นโปรแกรมทางด้านสถิติได้

ออกแบบมาเพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ทางด้านสถิตเป็นงานที่สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น ตลอดจนการแสดงผลทั้งผลลัพธ์และการนำเสนอในรูปแบบของกราฟ



รูป 2.7 โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ