

บทที่ 3

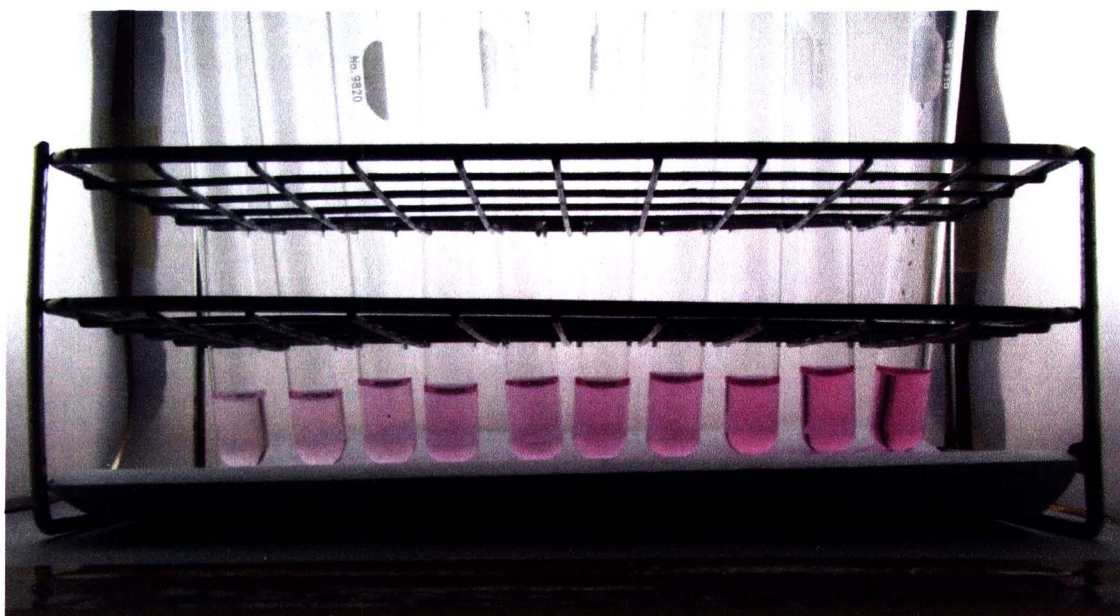
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการสอบเทียบวัดสีมาตรฐานเพื่อบ่งชี้ความเข้มข้นของสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์

3.1.1 กล้องถ่ายภาพรูปมาตรฐานระบบปิดกันแสงจากภายนอก

กล้องถ่ายภาพที่ถูกสร้างขึ้นพบว่าสามารถให้แสงสว่างได้สม่ำเสมอ แต่มีข้อจำกัดในการใส่หลอดทดลองได้เพียง 10 หลอด ดังนั้นการเตรียมสารละลายที่มีหลายความเข้มข้นจึงไม่สะดวกที่จะนำมาถ่ายทั้งหมดพร้อมกันภายในครั้งเดียว ดังที่แสดงในภาพ 3.1

ในขั้นตอนกล้องได้ถูกใช้ถ่ายรูปสีของสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ในหลอดทดลองที่มีความเข้มข้น 3 กลุ่ม คือ 0.01, 0.02, 0.03, ..., 0.09 ppm และ 0.10, 0.20, 0.30, ..., 0.90 ppm และ 1.00, 2.00, 3.00, ..., 8.00 ppm การแยกถ่ายภาพหลอดทดลอง 3 ครั้งเกิดปัญหาการให้สีที่แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ เนื่องจากสารละลายทั้ง 3 กลุ่ม รวมทั้งหมด 26 ความเข้มข้น ต้องนำมาตรวจวัดค่าสีเพื่อสร้างสมการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องถ่ายภาพหลอดทดลองทั้งหมดในครั้งเดียว จึงถ่ายภาพภายใต้แสงธรรมชาติโดยปรับ white balance ของกล้องให้ได้สีที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด



ภาพ 3.1 สารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆที่ถูกถ่ายในกล้องถ่ายภาพรูปมาตรฐาน



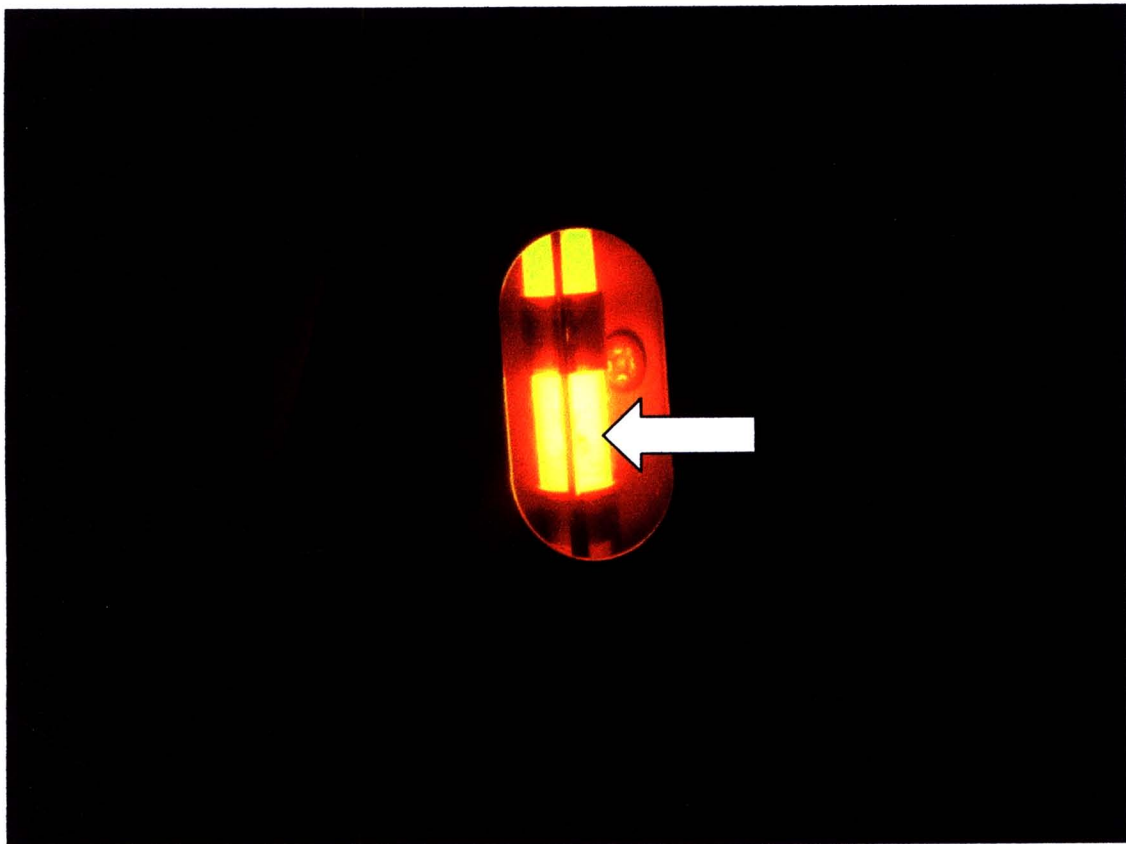
3.1.2 การถ่ายรูปหลอดมาตรฐานความยาวคลื่นเดียว

ภาพหลอดมาตรฐานถูกถ่ายในห้องปฏิบัติการแสง (optics) ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทำการถ่ายภาพหลอดสเปกตรัมมาตรฐานทั้งหมด 3 หลอด ได้แก่ หลอด Na (โซเดียม) หลอด Ne (นีออน) และ หลอด Ar (อาร์กอน) เหตุผลที่เลือกหลอดมาตรฐานทั้ง 3 หลอดนี้คือ มีสีที่ชัดเจน นีออนมีค่าสี R และ G เด่น หลอดอาร์กอนมีค่าสี R และ B เด่น ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

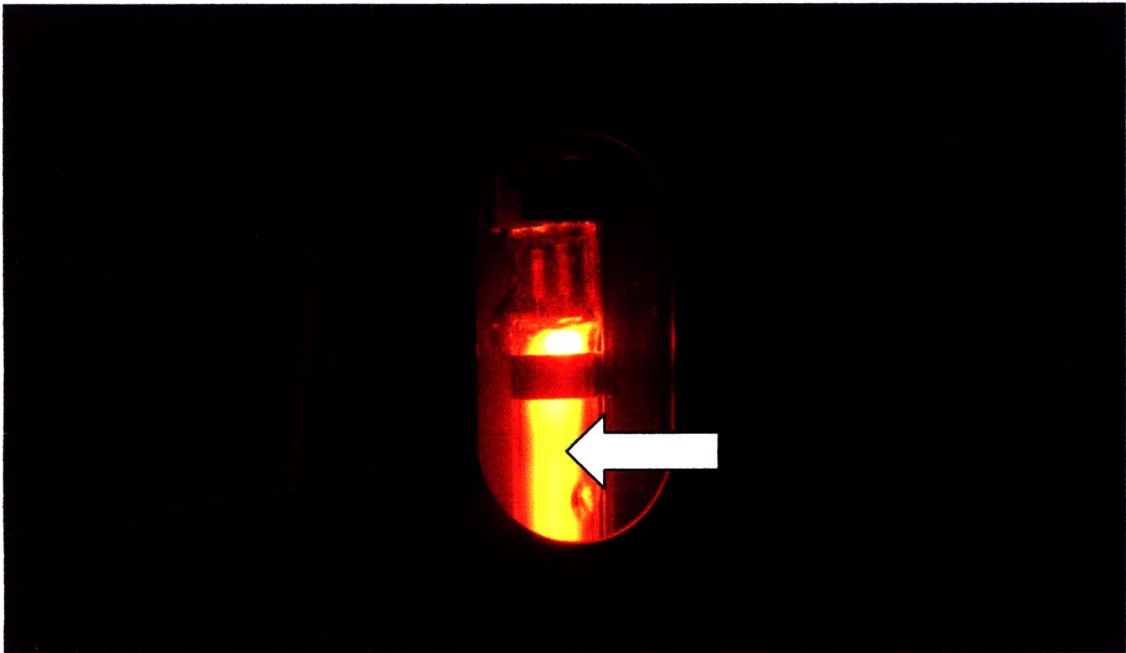
หลอดมาตรฐานความยาวคลื่นเดียวโซเดียมให้ค่าสี RGB (red, green และ blue) เท่ากับ 246, 255, 173 ตามลำดับ โดยถูกถ่ายที่ ISO 100, Shutter Speed 1/60 f 5.6 และ white balance shade ตามภาพ 3.2

หลอดมาตรฐานความยาวคลื่นเดียวนีออนให้ค่าสี RGB (red, green และ blue) เท่ากับ 242, 255, 47 ตามลำดับ โดยถูกถ่ายที่ ISO 100, Shutter Speed 1/60 f 5.6 และ white balance shade ตามภาพ 3.3

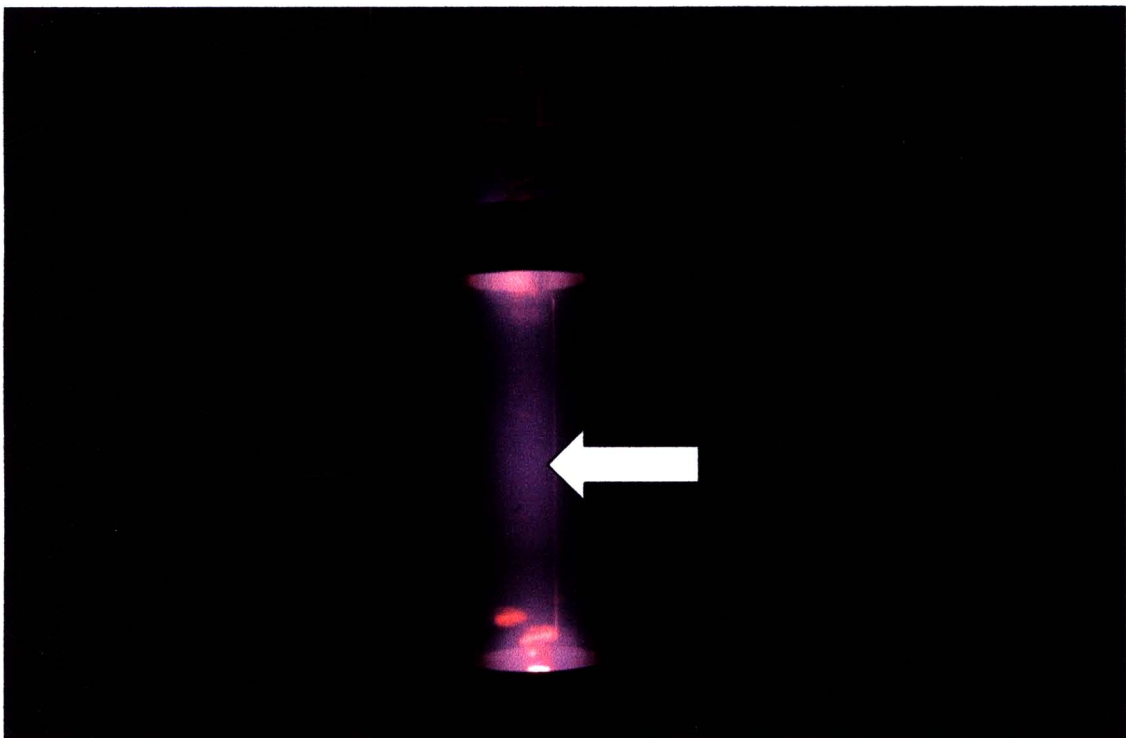
หลอดมาตรฐานความยาวคลื่นเดียวอาร์กอนให้ค่าสี RGB (red, green และ blue) เท่ากับ 126, 74, 138 ตามลำดับ โดยถูกถ่ายที่ ISO 100, Shutter Speed 1/60 f 5.6 และ white balance shade ได้ตามภาพ 3.4



ภาพ 3.2 หลอดมาตรฐานความยาวคลื่นเดียวโซเดียม ถูกตรแสงจุดที่ตรวจวัดค่าสี RGB



ภาพ 3.3 หลอดมาตรฐานความยาวคลื่นเดี่ยวนีออน ลูกศรแสดงจุดที่ตรวจวัดค่าสี RGB



ภาพ 3.4 หลอดมาตรฐานความยาวคลื่นเดี่ยวอาร์กอน ลูกศรแสดงจุดที่ตรวจวัดค่าสี RGB

3.1.3 การตรวจวัดค่ามาตรฐานวิธีการ (Calibrate method) ของการตรวจวัดค่าสีด้วยโปรแกรมมาตรฐาน Photoshop CS4

สารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.01 ppm ถูกถ่ายในสภาพแสงสิ่งแวดล้อมด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ (Mode P: program) 1 รูป แล้วทำการวัดค่าสี RGB ด้วยโปรแกรม Photoshop CS4 ซ้ำ 30 ครั้ง ให้ค่าสี RGB ตามตาราง 3.1 ได้ค่าเฉลี่ยสี RGB เท่ากับ 230.30, 218.93 และ 228.00 ตามลำดับ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.84, 1.11 และ 0.69 ตามลำดับ มีค่าความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ 0.70, 1.24 และ 0.48 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of Variation) เท่ากับ 0.0030, 0.0056 และ 0.0021 ตามลำดับ

จากการทดลองทำซ้ำการวัดค่าสีด้วยโปรแกรมมาตรฐาน Photoshop CS4 พบว่า ความแม่นยำในการวัดซ้ำในการวัดค่าสีที่สูงกว่าได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of Variation) ที่มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถใช้โปรแกรม Photoshop CS4 และวิธีการตรวจวัดค่าสีดังกล่าวได้

ตาราง 3.1 ค่าสี RGB ที่วัดได้จากโปรแกรม Photoshop ทำซ้ำ 30 ครั้ง

ครั้งที่	R	G	B
1	231	220	228
2	230	218	228
3	231	218	227
4	231	219	227
5	231	219	228
6	229	219	228
7	230	221	228
8	230	218	227
9	231	218	229
10	231	218	228
11	231	219	228
12	228	221	229
13	229	218	229
14	230	218	228
15	230	218	228
16	231	218	227
17	230	219	229
18	231	219	228
19	231	219	228
20	231	221	229
21	229	219	229
22	230	221	227
23	229	218	227
24	230	218	228
25	230	218	228
26	231	219	228
27	231	221	227
28	231	218	229
29	230	218	228
30	231	220	228
ค่าเฉลี่ย	230.30	218.93	228.00
SD	0.84	1.11	0.69
Variance	0.70	1.24	0.48
Coefficient of Variation	0.0030	0.0056	0.0021

3.1.4 การถ่ายรูปการปรับตั้งค่ามาตรฐานกล้องถ่ายรูปดิจิทัล (Calibrate digital camera)

ตาราง 3.2 ค่าสี RGB ที่ได้จากการถ่ายรูป 30 ครั้ง แล้วทำการวัดด้วยโปรแกรม Photoshop

ครั้งที่	R	G	B
1	231	212	216
2	231	213	215
3	231	213	215
4	231	212	215
5	231	213	215
6	229	214	216
7	230	213	215
8	230	213	215
9	231	213	215
10	231	212	215
11	231	212	215
12	231	213	216
13	229	213	215
14	230	213	215
15	230	212	215
16	231	212	215
17	231	213	215
18	231	213	216
19	231	212	215
20	229	213	215
21	230	214	214
22	231	213	215
23	231	213	215
24	231	214	215
25	229	213	216
26	230	213	215
27	230	213	215
28	231	212	214
29	230	212	215
30	231	213	215
Average	230.47	212.80	215.10
STDEV	0.73	0.61	0.48
Variance	0.53	0.37	0.23
Coefficient of Variation	0.0023	0.0018	0.0011

สารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.01 ppm ถูกถ่ายในสภาพแสงสิ่งแวดล้อม ด้วย mode manual ตั้งค่า ISO 100, Shutter Speed 1/30s, f 5.6 และ White Balance Shade จำนวน 30 ภาพ แล้วทำการวัดค่าสี RGB ด้วยโปรแกรม Photoshop CS4 ทุกภาพ ให้ค่าสี RGB ตามตาราง 3.2 โดยได้ค่าเฉลี่ยสี RGB เท่ากับ 230.47, 212.80 และ 215.10 ตามลำดับ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.73, 0.61 และ 0.48 ตามลำดับ มีค่าความแปรปรวน (Variance) เท่ากับ 0.53, 0.37 และ 0.23 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of Variation) เท่ากับ 0.0023, 0.0018 และ 0.0011 ตามลำดับ

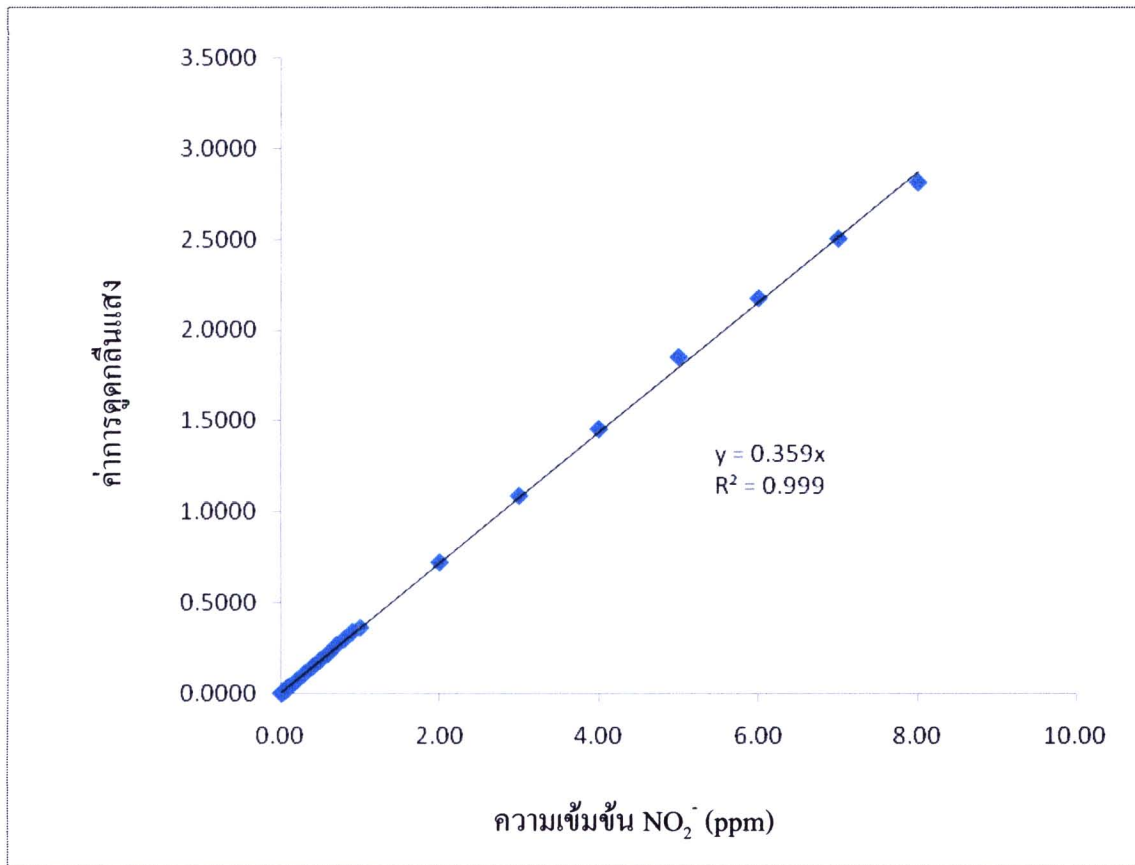
จากการทดลองทำซ้ำการถ่ายภาพ พบว่า ความแม่นยำในการให้ค่าสีของกล้องมีค่าสามารถ ถ่ายซ้ำได้โดยให้ค่าสีที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งวัดได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of Variation) ที่มีค่าน้อยมาก ดังนั้นกล้องถ่ายภาพดังกล่าวจึงสามารถให้สีที่ตรงกันทุกครั้งที่ถ่ายภาพ

3.1.5 การสร้างกราฟความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

สารละลายมาตรฐานไนโตรเจนไดออกไซด์ถูกเตรียมที่ความเข้มข้น 0.01- 0.90 ppm และ 0.10-0.90 ppm และ 1.00- 8.00 ppm นำไปวัดค่าด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตเมตริ์ได้ค่าตามตารางที่ 3.3 และ ภาพ 3.5 วิเคราะห์ค่า regression โดยแกน Y คือค่าการดูดกลืนแสง แกน X คือค่าความเข้มข้นของสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ได้สมการเส้นตรง $Y=0.359X$ ($R^2=0.999$)

ตาราง 3.3 ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ต่อการดูดกลืนแสง

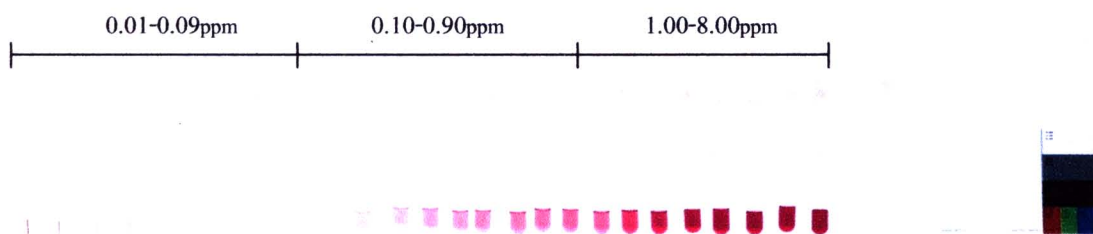
ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน ไนโตรเจนไดออกไซด์ (ppm)	ค่าเฉลี่ย (n=3)(ppm)	SD
0.01	0.0008	0.0010
0.02	0.0028	0.0022
0.03	0.0058	0.0035
0.04	0.0097	0.0038
0.05	0.0135	0.0038
0.06	0.0176	0.0039
0.07	0.0218	0.0038
0.08	0.0257	0.0032
0.09	0.0291	0.0039
0.10	0.0350	0.0036
0.20	0.0702	0.0031
0.30	0.1092	0.0029
0.40	0.1464	0.0047
0.50	0.1842	0.0033
0.60	0.2205	0.0039
0.70	0.2656	0.0058
0.80	0.2998	0.0036
0.90	0.3385	0.0050
1.00	0.3624	0.0021
2.00	0.7229	0.0052
3.00	1.0887	0.0085
4.00	1.4550	0.0072
5.00	1.8538	0.0096
6.00	2.1776	0.0120
7.00	2.5057	0.0158
8.00	2.8141	0.0146



ภาพ 3.5 กราฟสอบเทียบมาตรฐานความสัมพันธ์ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์กับค่าการดูดกลืนแสง

หลังจากตรวจวัดค่าด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตเมตรีแล้ว นำหลอดสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ทั้งหมดมาถ่ายรูปโดยเรียงตามภาพ 3.6 โดยตั้งกล้องถ่ายรูปเป็น ISO 100, Shutter Speed 1/80 f 4 และ white balance shade

จากนั้นก็นำไปตรวจวัดค่าสี RGB ด้วยโปรแกรม Photoshop CS4 ตามวิธีการทดลองข้อที่ 2.5.3 ได้ค่าสี RGB ในแต่ละความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ตามตาราง 3.4



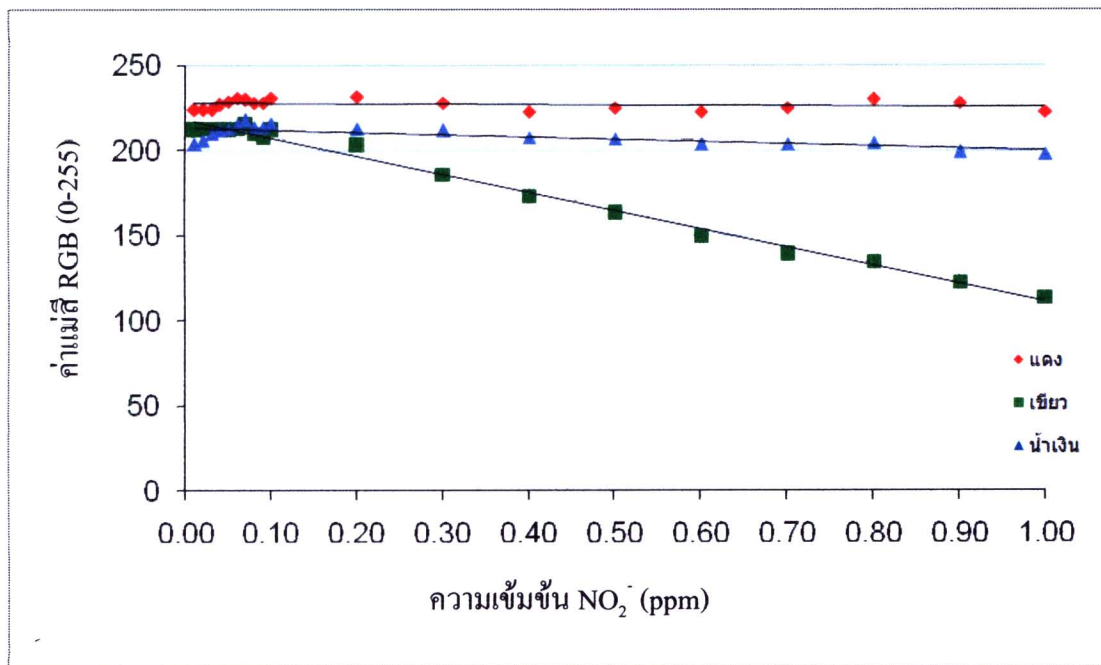
ภาพ 3.6 ภาพหลอดสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.01- 0.09 ppm และ 0.10- 0.90 ppm และ 1.00- 8.00 ppm ตามลำดับ

ตาราง 3.4 ค่าสี RGB ในแต่ละความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์

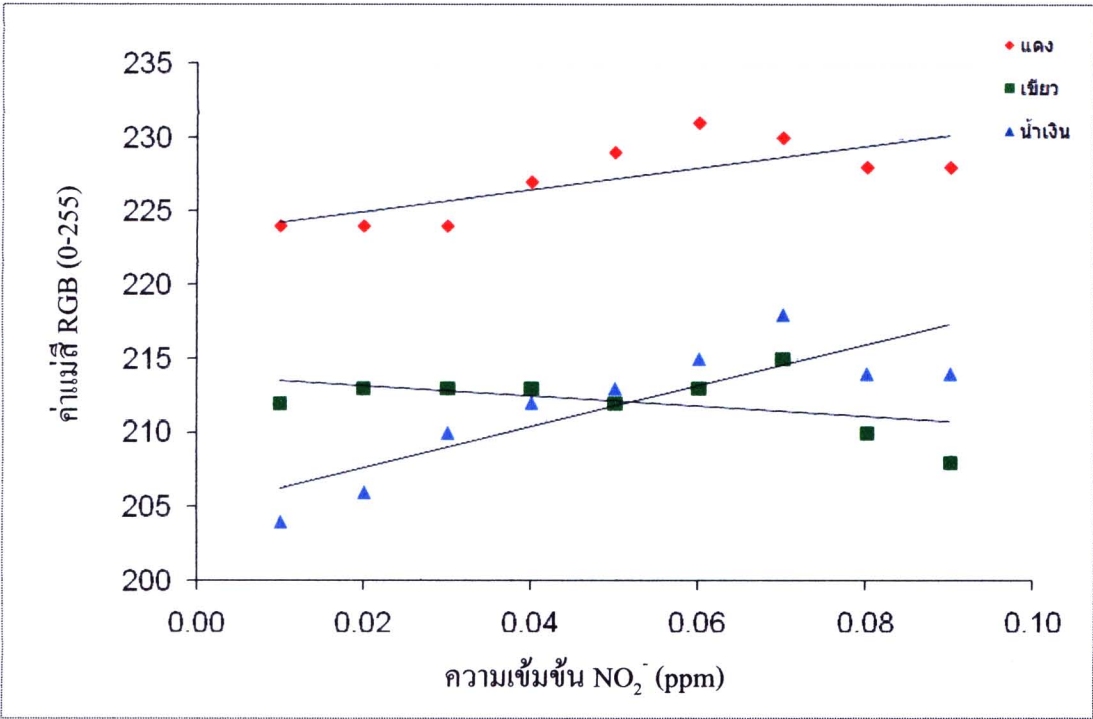
ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน ไนโตรเจนไดออกไซด์ (ppm)	ค่าแม่สี		
	R	G	B
0.01	224	212	204
0.02	224	213	206
0.03	224	213	210
0.04	227	213	212
0.05	229	212	213
0.06	231	213	215
0.07	230	215	218
0.08	228	210	214
0.09	228	208	214
0.10	231	212	216
0.20	232	203	213
0.30	228	186	212
0.40	223	173	208
0.50	225	163	207
0.60	223	150	204
0.70	225	139	204
0.80	230	135	205
0.90	228	123	199
1.00	223	114	198
2.00	218	47	176
3.00	215	11	159
4.00	203	0	138
5.00	200	0	128
6.00	191	0	112
7.00	189	0	108
8.00	180	0	98

ข้อมูลค่าสี RGB ถูกนำมาวาดเป็นกราฟ ตามที่แสดงใน ภาพ 3.7 จะเห็นได้ว่าช่วงความเข้มข้นมีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ความเข้มข้น 0.01-0.09 ppm และ 0.10- 0.90 ppm และ 1.00 ppm เมื่อนำมาสร้างกราฟในช่วงต้นข้อมูลจะชิดกันมาก ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ จึงได้ทำการแยกกราฟแสดงข้อมูลออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ความเข้มข้น 0.01- 0.10 ppm แสดงผลในภาพ 3.8 ช่วงที่ 2 ความเข้มข้น 0.10-1.00 ppm แสดงผลในภาพ 3.9 ช่วงที่ 3 ความเข้มข้น 1.00-8.00 ppm แสดงผลในภาพ 3.10

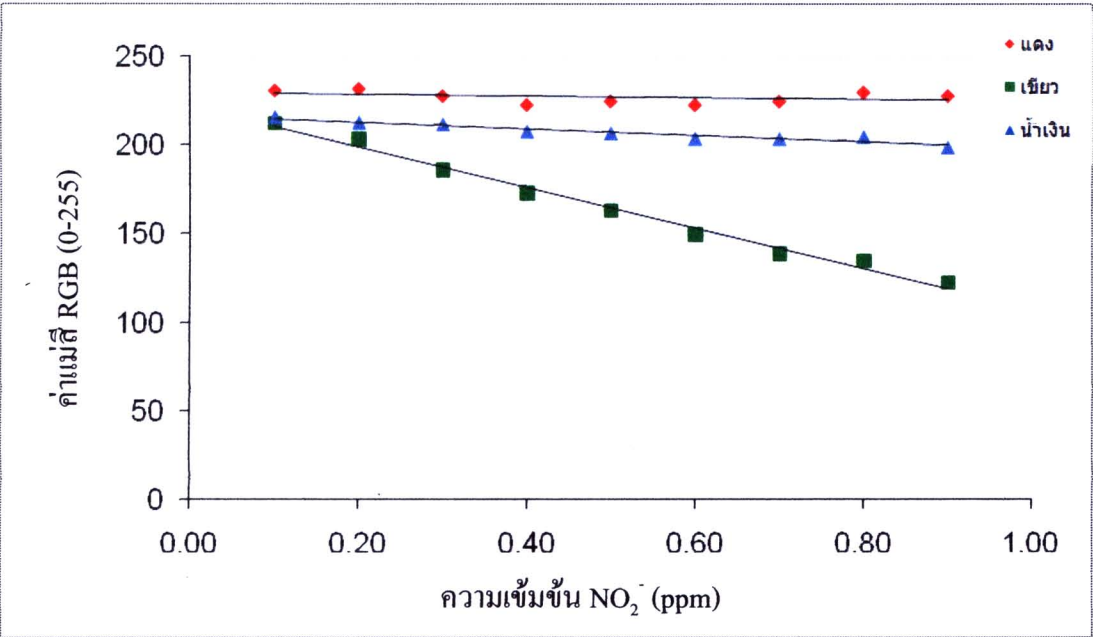
ภาพ 3.7, 3.8, 3.9 และ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ (ppm) กับค่าสี RGB (0-255) จุดรูปเพชร (สีแดง) คือข้อมูลของสีแดง จุดรูปสี่เหลี่ยม (สีเขียว) คือข้อมูลของสีเขียว จุดรูปสามเหลี่ยม (สีฟ้า) คือข้อมูลของสีฟ้า



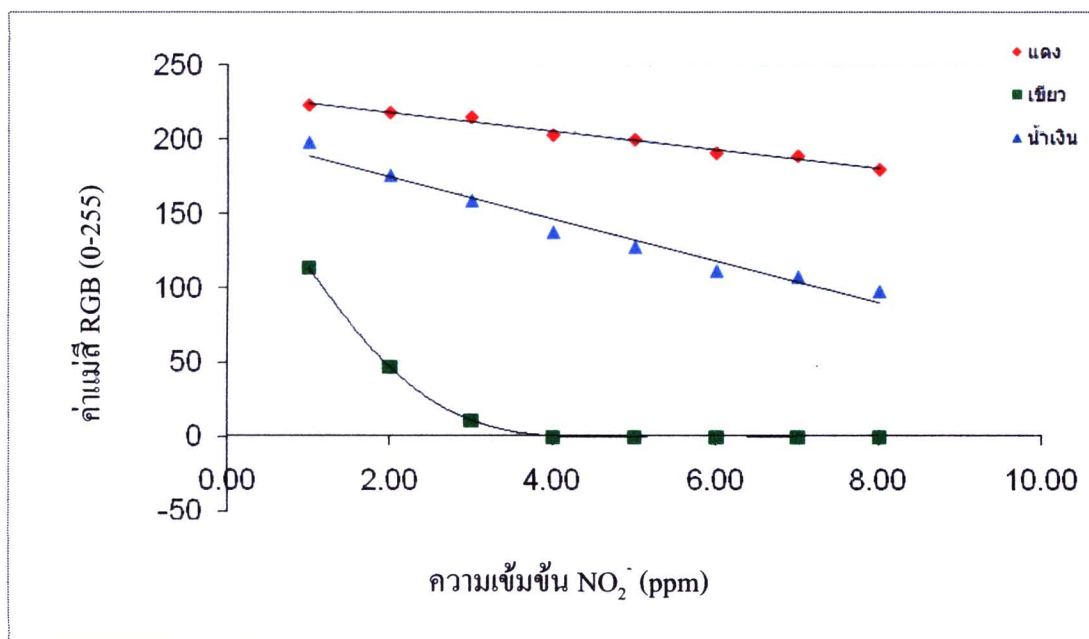
ภาพ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี RGB กับ ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์
ช่วง 0.01-1.00 ppm



ภาพ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี RGB กับ ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ ช่วง 0.01-0.09 ppm



ภาพ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี RGB กับ ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ ช่วง 0.10-0.90 ppm

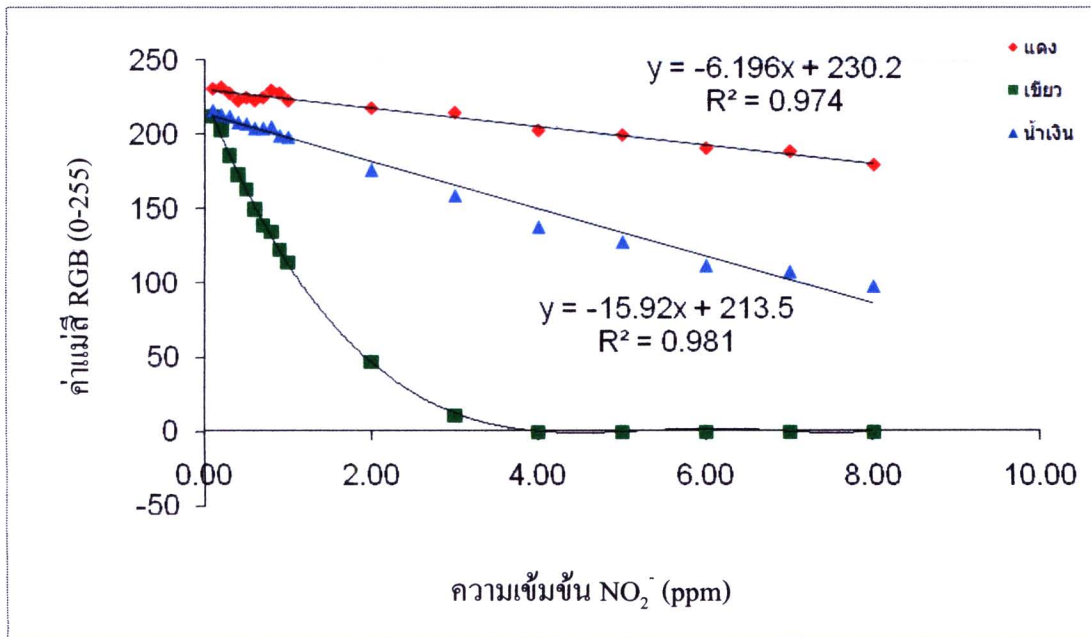


ภาพ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี RGB กับ ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ ช่วง 1.00-8.00 ppm

จากภาพ 3.7 ในช่วงความเข้มข้นต่ำ (0.01-0.09 ppm) มีแนวโน้มของเส้นกราฟเป็นรูปภูเขา ดังภาพ 3.8 ซึ่งแตกต่างจากภาพ 3.9 และ 3.10 ซึ่งเส้นกราฟมีแนวโน้มลาดชันลง จึงได้ทำการแยกส่วนสมการความเข้มข้นเป็น 2 ส่วนคือ ความเข้มข้นต่ำ (0.01-0.09 ppm) และความเข้มข้นปานกลาง ถึงความเข้มข้นสูง (0.10-8.00 ppm)

เมื่อรวมกราฟค่าสี RGB กับไนโตรเจนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.10-0.90 ppm และ 1.00-8.00 ppm จะได้กราฟดังภาพ 3.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดสามเหลี่ยม (สีฟ้า) คือค่าของสีน้ำเงินเรียงตัวกันเป็นเส้นตรง สามารถสร้างเป็นสมการเส้นตรงได้ โดยมีค่า $R^2 = 0.981$ สมการเส้นตรง $Y = -15.92x + 213.5$ ส่วนจุดรูปเพชร (สีแดง) คือค่าของสีแดงมีค่า R^2 ที่น้อยกว่าจึงไม่นำมาใช้เป็นสมการทำนายความเข้มข้น

สมการดังกล่าวสามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ 0 ความเข้มข้นปานกลางถึงความเข้มข้นสูง (0.10-8.00 ppm) กับค่าสีน้ำเงิน (B) โดยความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ยังเพิ่มสูงขึ้น ความเข้มของสีน้ำเงินก็จะยิ่งลดลงเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งสามารถใช้สมการดังกล่าวในการทำนายความเข้มข้นของสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ได้จากค่าสี RGB ที่ได้จากภาพถ่ายสีของสารละลายตัวอย่าง

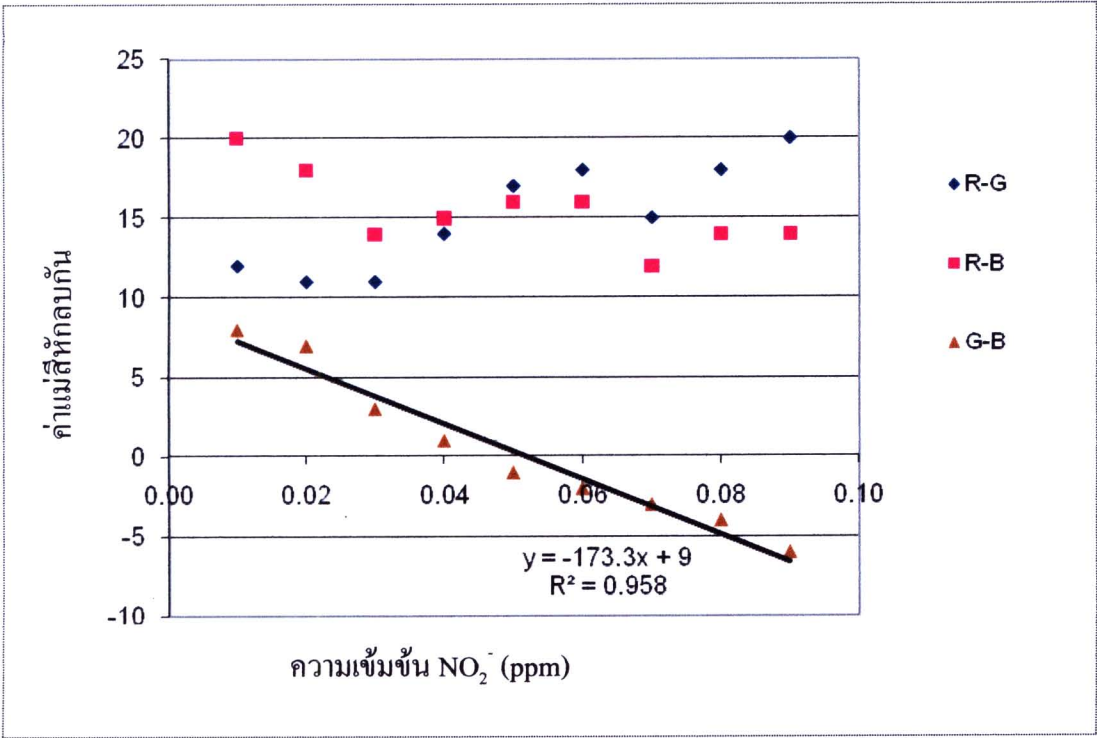


ภาพ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี RGB กับ ความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ ช่วง 0.10-8.00 ppm เพื่อสร้างสมการทำนายความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์

ในหลอดทดลองที่มีสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ความเข้มข้นต่ำ (0.01-0.09 ppm) เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์กับค่าสี RGB จะได้ตามภาพ 3.8 ซึ่งพบว่าจุดสีบนกราฟไม่สามารถสร้างเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ จึงนำค่าสี RGB ช่วงดังกล่าวมาสร้างตารางใหม่ขึ้น โดยนำค่าสี R-G (แดงลบเขียว), R-B (แดงลบน้ำเงิน) และ G-B (เขียวลบน้ำเงิน) ได้เป็นตาราง 3.5 และนำค่าที่ได้ไปวาดกราฟได้ผลตามภาพ 3.12 ที่แสดงให้เห็นว่าค่า G-B (เขียวลบน้ำเงิน) สามารถสร้างเป็นสมการเส้นตรงได้ โดยมีสมการ $Y = -173.3X + 9$ ($R^2 = 0.958$) สมการที่ได้นี้สามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.01- 0.09 ppm กับค่าสี G-B (เขียวลบน้ำเงิน) โดยความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ค่าความต่างของเขียวกับสีน้ำเงินก็จะยิ่งลดลงเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการดังกล่าวในการทำนายความเข้มข้นของสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ได้จากค่าสี RGB ที่ได้จากภาพถ่ายสีของสารละลายตัวอย่าง

ตาราง 3.5 ค่าหักลบแม่สี RGB ของไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.01- 0.09 ppm

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน ไนโตรเจนไดออกไซด์ (ppm)	ค่าแม่สี		
	R-G	R-B	G-B
0.01	12	20	8
0.02	11	18	7
0.03	11	14	3
0.04	14	15	1
0.05	17	16	-1
0.06	18	16	-2
0.07	15	12	-3
0.08	18	14	-4
0.09	20	14	-6



ภาพ 3.12 กราฟแสดงค่าแม่สีหักลบกัน ของไนโตรเจนไดออกไซด์ ความเข้มข้น 0.01-0.09 ppm



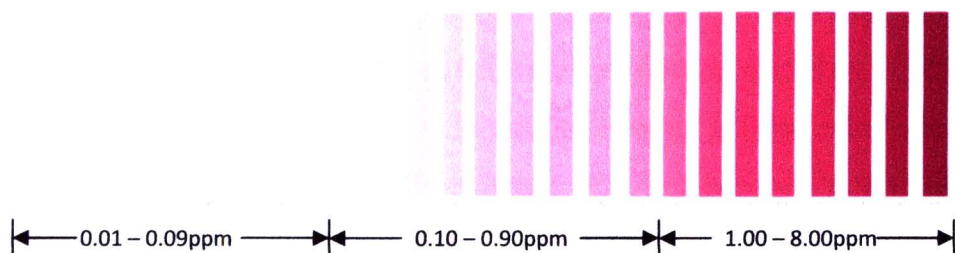
3.2 การผลิตแถบสีมาตรฐานให้มีความละเอียดสูง

3.2.1 การผลิตแถบสีมาตรฐานสำหรับ NO_2 – test kit แบบที่ 1 (NO_2 – d1)

ค่าสี RGB ที่ได้จากการทดลองที่ 2.5.5 ตามตารางที่ 3.5 ถูกกรอกเป็นค่าสีใน Photoshop CS4 วาดเป็นแถบสีที่มีความเข้มข้น 0.01- 0.09 ppm และ 0.10- 0.90 ppm และ 1.00- 8.00 ppm รวมทั้งหมด 26 แถบสี แสดงในภาพ 3.13

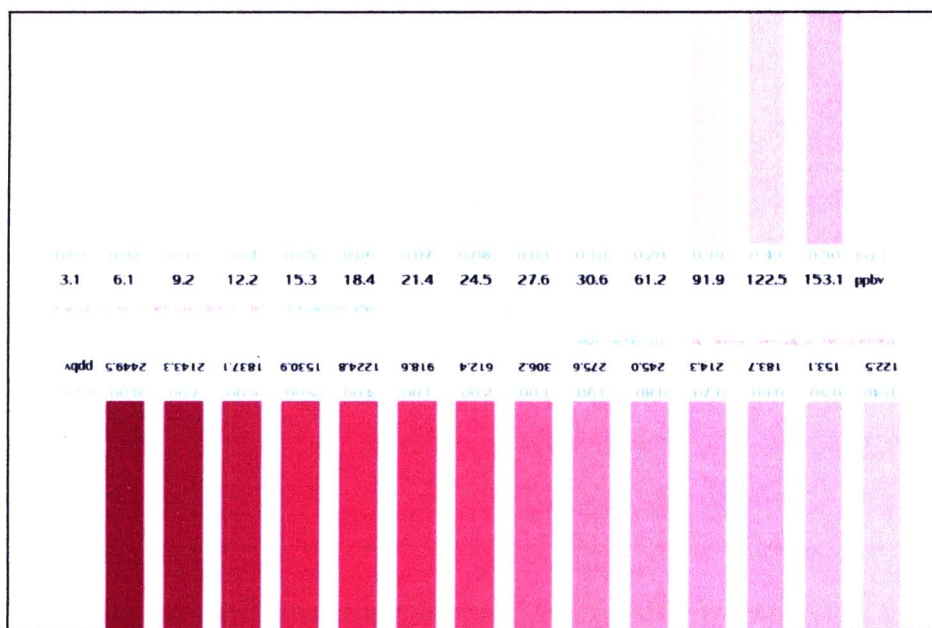
Standard Color of Nitrogen Dioxide (NO_2)

10 minutes after



ภาพ 3.13 แถบสีสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ 26 แถบสี

แถบสีทั้ง 26 สี (มีทั้งหมด 28 แถบเนื่องจากต้องการให้เกิดความต่อเนื่องในการอ่านแถบสี) ถูกจัดเรียงให้อยู่ในขนาดกระดาษ 4"x6" ด้วยโปรแกรม Photoshop CS4 แล้วส่งอัดรูปที่ Lab อัดรูปมาตรฐาน โดยใช้กระดาษอัดรูปของ FUJI Film ขนาด 4x6 นิ้วแบบด้านเพื่อลดแสงสะท้อน (ภาพ 3.14)



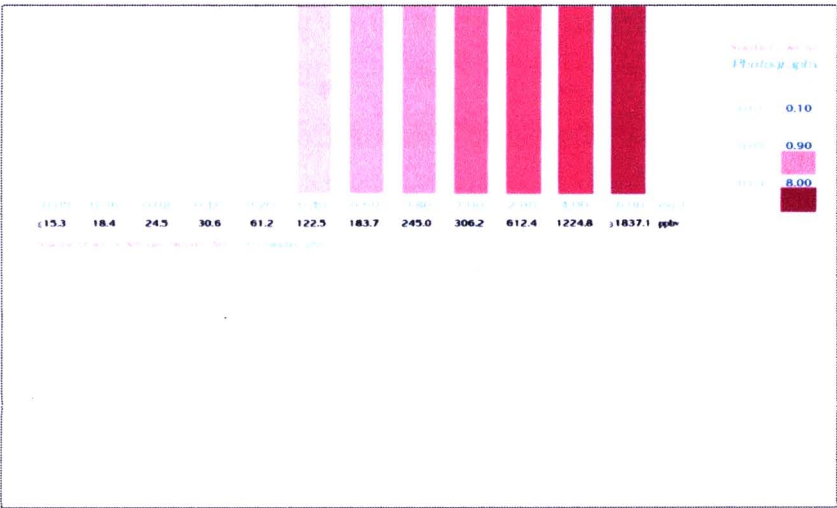
ภาพ 3.14 ภาพแถบสีสารละลาย NO_2 – d1 ความเข้มข้น 0.01-8.00ppm (mg/L) จำนวน 26 แถบสี

แถบสีถูกออกแบบให้มี 2 ด้าน คือ ด้านบนและด้านล่าง การกลับด้านของด้านล่างเพื่อสามารถตัดแยกแถบสีได้ หรือถ้าไม่ตัดแยก ก็สามารถที่จะดูสีได้ง่ายโดยการสอดหลอดสารละลายไว้ทางด้านหลังของแถบสี ด้านบนแสดงแถบสีที่ความเข้มข้น 0.01-0.50 ppm และด้านล่างแสดงแถบสีที่ความเข้มข้น 0.40-8.00 ppm (ภาพ 3.7) ตัวเลขที่แสดงบนแถบสีถูกแสดงเป็น 2 บรรทัด ตัวเลขด้านบน (สีฟ้า) จะแสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ (ppm หรือ mg/L) ส่วนตัวเลขด้านล่าง (สีดำ) แสดงค่าของปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในอากาศ (ppbv)

เมื่อเปรียบเทียบแถบสีที่พัฒนาขึ้นใหม่ (ภาพ 3.14) กับแถบสีของ Chalermrom (2008) (ภาพ 1.6) จะเห็นได้ว่าแถบสีจากเดิมมีเพียง 6 แถบสี เพิ่มขึ้นเป็น 26 แถบสี ซึ่งหมายความว่ามีความละเอียดเพิ่มขึ้น 4.3 เท่า เมื่อวัดตามระดับความเข้มข้นแล้วพบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ จากเดิม มี 2 แถบสี คือ ความเข้มข้น 0.03 ppm และ 0.06 ppm ถูกขยายเป็น 9 แถบสี คือ 0.01, 0.02, 0.03, ..., 0.09 ppm ซึ่งมากกว่าเดิมถึง 4.5 เท่า ที่ความเข้มข้นกลาง (0.10-0.90 ppm) จากเดิม มี 3 แถบสี คือ ความเข้มข้น 0.1, 0.4 และ 0.8 ppm ถูกขยายเป็น 9 แถบสี คือ 0.10, 0.20, 0.30, ..., 0.90 ppm ซึ่งมากกว่าเดิมถึง 3 เท่า และที่ความเข้มข้นสูง (1.00-8.00 ppm) จากเดิม มี 1 แถบสี คือ ความเข้มข้น 1.5 ppm ถูกขยายเป็น 8 แถบสี คือ 1.00-8.00 ppm ซึ่งมากกว่าเดิมถึง 8 เท่า

3.2.1 การผลิตแถบสีมาตรฐานสำหรับ NO₂ – test kit แบบที่ 2 (NO₂ – d2)

จากการทำแบบสำรวจ NO₂ – d1 ทำให้ทราบข้อจำกัดของแถบสีนั้นๆ จึงได้ปรับปรุงแถบสี NO₂ – d2 โดยแถบสีใหม่นี้มี 12 แถบสี คือ ≤ 0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00, 2.00, 4.00 และ ≥ 6.00 ppm ดังภาพ 3.15



ภาพ 3.15 ภาพแถบสีสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์ปรับปรุงใหม่ (NO₂ – d2)
บนกระดาษอัดรูปขนาด 4"x6"

3.3 การพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อคำนวณความเข้มข้นของ NO_2 จากภาพถ่าย

โปรแกรมสำเร็จรูป ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษา C++ โดยใช้โปรแกรม Microsoft .NET Framework 3.0 ซึ่งใช้สมการจากผลการทดลองข้อ 3.1.5 ที่มีอยู่ 2 สมการ คือ $Y = -173.3X + 9$ ($R^2 = 0.958$) เป็นของช่วงความเข้มข้นต่ำ 0.01-0.09 ppm และ $Y = -15.92x + 213.5$ ($R^2 = 0.981$) ที่ความเข้มข้นสูง 0.10-0.80 ppm

วิธีการใช้งานโปรแกรมสามารถทำได้ง่าย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนของการถ่ายภาพ และส่วนของการใช้งานคอมพิวเตอร์

1. การถ่ายภาพ ต้องถ่ายรูปสีของสารละลายที่บรรจุในหลอด cuvet (ด้านหนึ่งของ cuvet จะติดกระดาษสีขาวไว้เป็นฉากหลัง) โดยต้องถ่ายภาพหลอด cuvet ที่มีสารละลายตัวอย่าง พร้อมกับแถบสีในภาพที่ 3.7 (หลอดและแถบสีอยู่ในภาพเดียวกัน)

2. การใช้งานคอมพิวเตอร์ ให้เปิดโปรแกรม Photoshop CS4 และ NO_2 Calculator ขึ้นแรก ต้องเลือกชุดสมการจากโปรแกรม NO_2 Calculator ก่อน โดยดูว่าสีของสารละลายอยู่ในช่วงความเข้มข้นสูงหรือต่ำ (เทียบจากแถบสีในภาพ 3.14) เมื่อเลือกได้แล้วให้ใช้ โปรแกรม Photoshop CS4 เปิดภาพสารละลายตัวอย่าง และตรวจวัดค่าสีตามวิธีการทดลองที่ 2.5.3 ในจุดที่โปรแกรม NO_2 Calculator ต้องการในการสร้างสมการ (1 สร้างสมการ) ชุดสมการ 0.01-0.09 ppm (ภาพ 3.15 ด้านซ้าย) จะต้องใส่ค่าสี RGB ของแถบสีที่มีความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 0.09 ppm ส่วนชุดสมการ 0.10-8.00 ppm (ภาพ 3.15 ด้านขวา) จะใส่ค่าสี RGB ของแถบสีที่มีความเข้มข้น 0.10, 0.90 และ 8.00 ppm จากนั้นก็ตรวจวัดค่า RGB ของตัวอย่างแล้วกรอกค่าลงในส่วนที่ 2 หาความเข้มข้น ช่องสีของสารละลาย RGB เมื่อกรอกค่าต่างๆครบถ้วนแล้วให้คลิกที่ปุ่ม "หาความเข้มข้น" หากต้องการลบข้อมูลทุกช่องให้คลิกที่ปุ่ม "ล้างข้อมูล" การออกจากโปรแกรมสามารถทำได้โดยการให้คลิกที่ปุ่ม "ปิดโปรแกรม"

ข้อเสนอแนะ : เพื่อไม่ให้เป็นการเสียเวลา การถ่ายภาพใน 1 ครั้งสามารถถ่ายหลอดตัวอย่างหลายๆหลอดภาพในครั้งเดียวได้

ข้อควรระวัง : การถ่ายภาพหลอดสารละลายตัวอย่างควรถ่ายโดยให้หลอดสารละลายอยู่ในกระดาษแถบสีมาตรฐาน โดยส่วนของสารละลายอยู่บนพื้นสีขาวของกระดาษแถบสีมาตรฐาน เพื่อมิให้สีของสารละลายผิดเพี้ยนด้วยภาพสิ่งแวดล้อม

(ก)



(ข)


ภาพ 3.16 โปรแกรม NO₂ Calculator

(ก) คำนวณโดยใช้ชุดสมการความเข้มข้นต่ำ

(ข) คำนวณโดยใช้ชุดสมการความเข้มข้นสูง

3.4 การทำแบบสำรวจการอ่านค่าสีสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์กับแถบสีที่ถูกพัฒนาใหม่

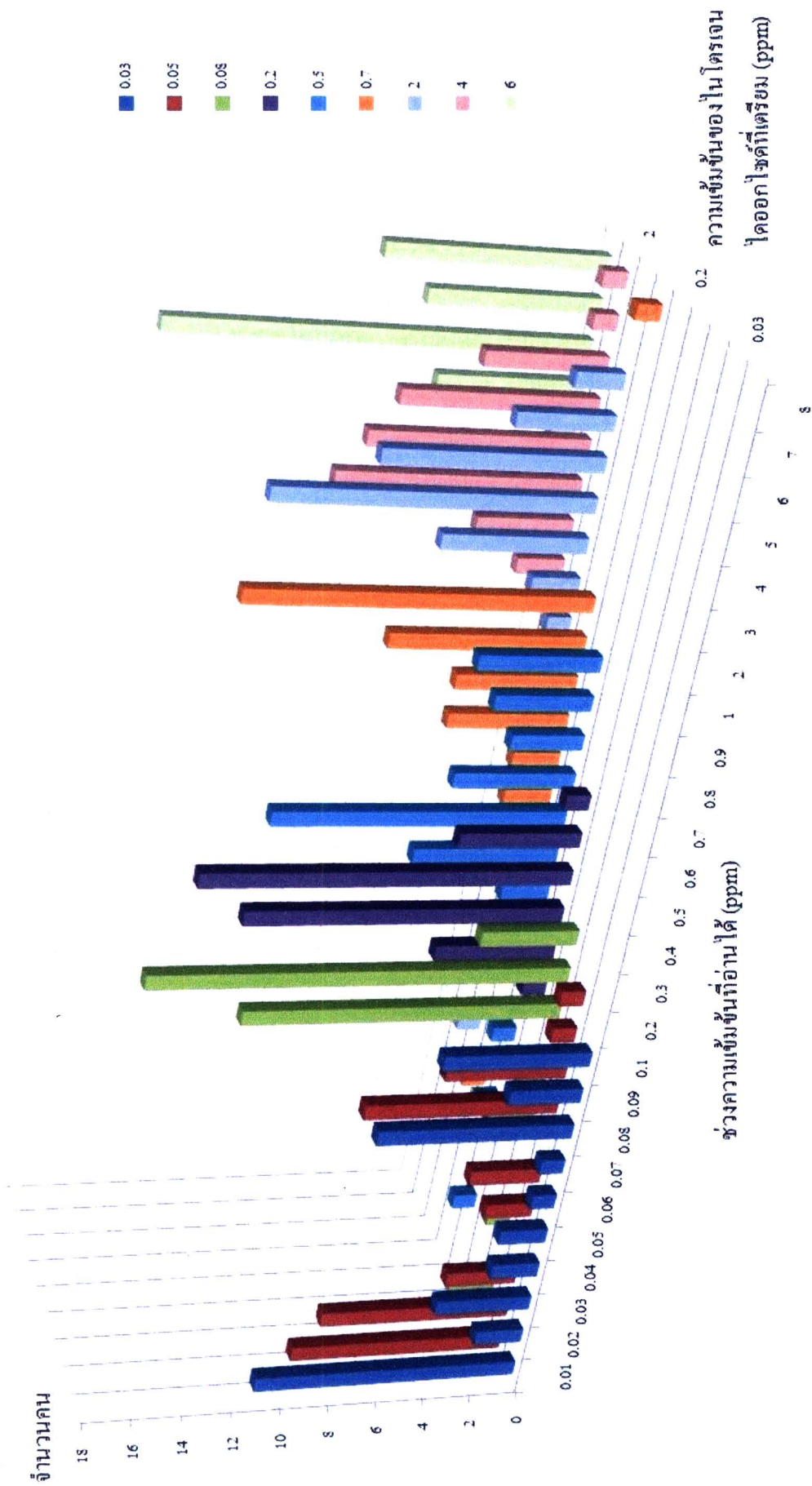
เตรียมสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์จำนวน 9 หลอด 9 ความเข้มข้น ประกอบด้วยความเข้มข้น 0.03, 0.05, 0.08, 0.20, 0.50, 0.70, 2.00, 4.00 และ 6.00 ppm เพื่อใช้ทดสอบการอ่านค่าเทียบกับแผ่นทดสอบโดยไม่เรียงลำดับความเข้มข้น

จากแบบสำรวจ 40 ชุดได้ทดสอบกับผู้ใช้งาน 40 คน โดยทดลองอ่านค่าสีของสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์กับแถบสีมาตรฐาน ในจำนวนนี้แบ่งเป็นชาย 30% หญิง 70% โดยมีช่วงอายุ 15-20 ปีเท่ากับ 57.50%, 21-25 ปีเท่ากับ 22.50% และ 25-30 ปีเท่ากับ 17.50% ทั้งหมดของผู้ทดสอบมีสายตาสี 55% สายตาสั้น-ยาว 45% โดยไม่พบผู้ที่มีตาบอดสี ผลการทดสอบไม่พบว่ามีเพศชายและสายตาสั้น-ยาว มีผลต่อการอ่านค่าสีของสารละลายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รายละเอียดการทดสอบแสดงในตาราง 3.6

ตาราง 3.6 ความเข้มข้น NO2 จากการใช้แบบ NO2 – d1

สารละลาย NO2 (ppm)	ค่าสารละลายที่อ่านได้ (ppm)																ค่าเฉลี่ย ความถูกต้อง ที่อ่านได้	%									
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70			0.80	0.90	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
0.03	11	2	4	2	2	1	1	1	8	3	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0
0.05	9	8	3	-	2	3	-	8	5	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0
0.08	-	2	-	1	-	-	2	1	-	13	17	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5*
0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	5	13	15	5	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.5
0.50	-	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	2	6	12	5	3	4	5	-	-	-	-	-	-	-	-	30.0
0.70	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	1	2	2	5	5	8	14	-	-	-	-	-	-	1	12.5
2.00	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	1	2	6	13	9	4	2	-	-	15.0
4.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	4	10	9	8	5	1	1	22.5
6.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	6	17	7	9	42.5**
ค่าเฉลี่ย=SD																											16.9-8

* min , ** max



ภาพ 3.17 การกระจายตัวของค่าอ่านค่าไนโตรเจนไดออกไซด์ NO₂ จากการใช้แลบซี NO₂ -d1

จากตาราง 3.6 เมื่อแบ่งกลุ่มความเข้มข้นเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีความเข้มข้นต่ำ เข้มข้นปานกลาง และเข้มข้นสูง พบว่าในช่วงความเข้มข้น 0.03, 0.05 และ 0.08 ppm มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการอ่านค่าแถบสีเท่ากับ 2.5 ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด ช่วงความเข้มข้น 0.20, 0.50 และ 0.70 ppm มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น และ ช่วงความเข้มข้น 2.00, 4.00 และ 6.00 ppm มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงที่สุดเท่ากับ 42.5 ซึ่งค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการอ่านมีค่าเท่ากับ 17 ± 8

ระดับความพึงพอใจในการใช้งานแถบสีใหม่นี้ 10% พึงพอใจมากที่สุด 60% พึงพอใจมาก 20% พึงพอใจปานกลาง และ 10% พึงพอใจน้อย โดยส่วนใหญ่ให้ความเห็นว่าแถบสีมาตรฐานมีสีที่ใกล้เคียงกันมาก จึงทำให้พิจารณาแยกความแตกต่างได้ยาก

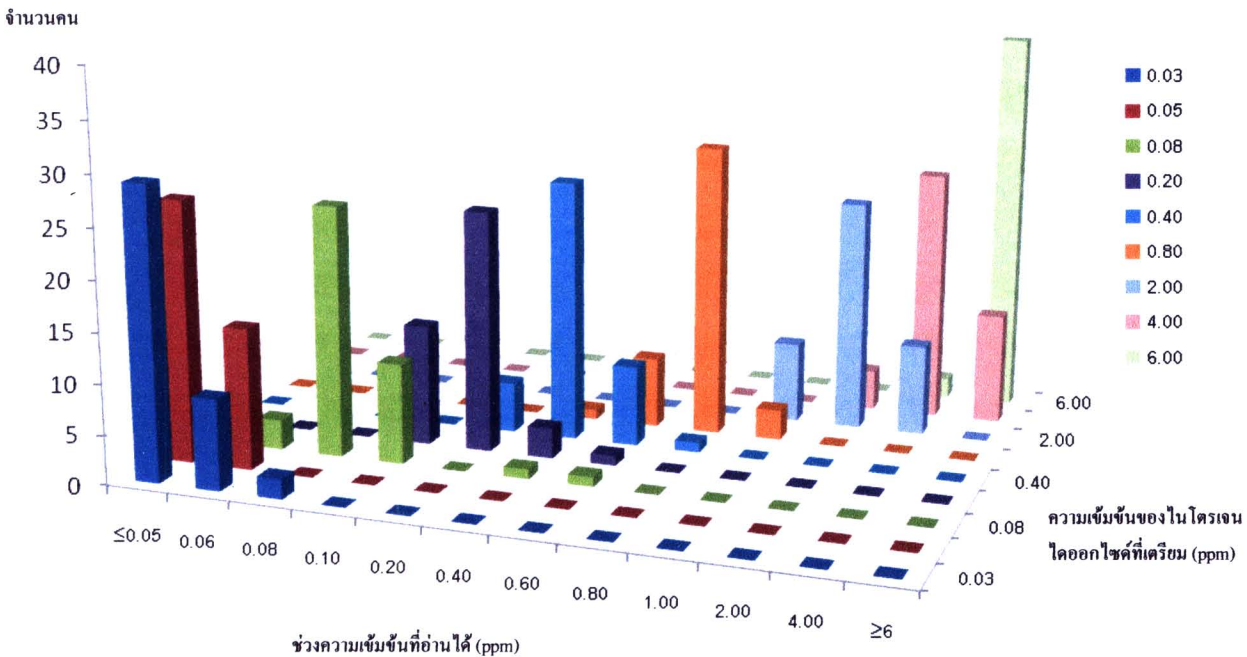
ดังนั้นจึงได้ปรับปรุงแถบสีขึ้นใหม่โดยใช้สีจากแถบสี $\text{NO}_2 - \text{d1}$ (3.14) ได้เป็นแถบสี $\text{NO}_2 - \text{d2}$ (3.15) ซึ่งแถบสีใหม่นี้ได้ถูกทดสอบกับผู้ใช้งาน 40 คน โดยอ่านค่าสีของสารละลายไนโตรเจนไดออกไซด์กับแถบสีมาตรฐานที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งสารละลาย NO_2 ถูกเตรียมขึ้นมีจำนวน 9 หลอด 9 ความเข้มข้น ได้แก่ ความเข้มข้น 0.03, 0.05, 0.08, 0.20, 0.40, 0.80, 2.00, 4.00 และ 6.00 ppm ถูกส่งให้ผู้ทดสอบดูโดยไม่เรียงลำดับความเข้มข้นได้ผลตามตาราง 3.7

จากผลการทดลองพบว่าแถบสีที่ปรับปรุงใหม่ช่วยให้ผู้ทำการทดสอบสามารถอ่านค่าสีของสารละลายได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 68.1% เมื่อเปรียบเทียบกับแถบสีมาตรฐานของ Chalermrom (2008) แล้วจะเห็นได้ว่า แถบสีที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความละเอียดมากขึ้น 2 เท่า คือจาก 6 แถบสี เป็น 12 แถบสี และมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจาก 64.9% เป็น 68.1%

ตาราง 3.7 ความเข้มข้น NO₂ จากการใช้อุปกรณ์ NO₂ – d2

สารละลาย NO2 (ppm)	ค่าสารละลายที่อ่านได้ (ppm)												ร้อยละ
	≤0.05	0.06	0.08	0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	2.00	4.00	≥6.00	ความถูกต้อง
0.03	29	9	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72.5
0.05	26	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65.0
0.08	-	3	25	10	-	1	1	-	-	-	-	-	62.5
0.20	-	-	-	12	24	3	1	-	-	-	-	-	60.0
0.40	-	-	-	-	5	26	8	1	-	-	-	-	65.0
0.80	-	-	-	-	-	1	7	29	3	-	-	-	72.5
2.00	-	-	-	-	-	-	-	-	8	23	9	-	57.5*
4.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	25	11	62.5
6.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	38	95.0**
ค่าเฉลี่ย±SD													68.1±10

* min , ** max



ภาพ 3.18 การกระจายตัวของการอ่านค่าสีของสารละลาย NO₂ จากการใช้อุปกรณ์ NO₂ – d2

จากข้อมูลในตาราง 3.7 นำมาสร้างกราฟได้ตามภาพ 3.18 แกนนอน (X) บอกถึงช่วงความเข้มข้นที่ผู้ทำแบบทดสอบอ่านได้ ส่วนแกนนอน (Y) คือสารละลายมาตรฐาน NO₂ ที่ได้เตรียมขึ้นมา และแกนแนวตั้ง (Z) บอกจำนวนผู้ที่อ่านค่า จากภาพ 3.18 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มผู้ที่สามารถอ่านได้ถูกต้อง จะอยู่ที่ค่าของสารละลายที่แท้จริง และจะผิดพลาดอ่านค่าได้ใกล้เคียงมีจำนวนเล็กน้อย ดังนั้นการกระจายตัวของค่าที่อ่านได้ถูกต้องมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้ผิด การใช้แถบสี NO₂ – d2 จึงให้ผลการอ่านค่าที่ถูกต้องกว่า แถบสี NO₂ – d1 อย่างเห็นได้ชัด

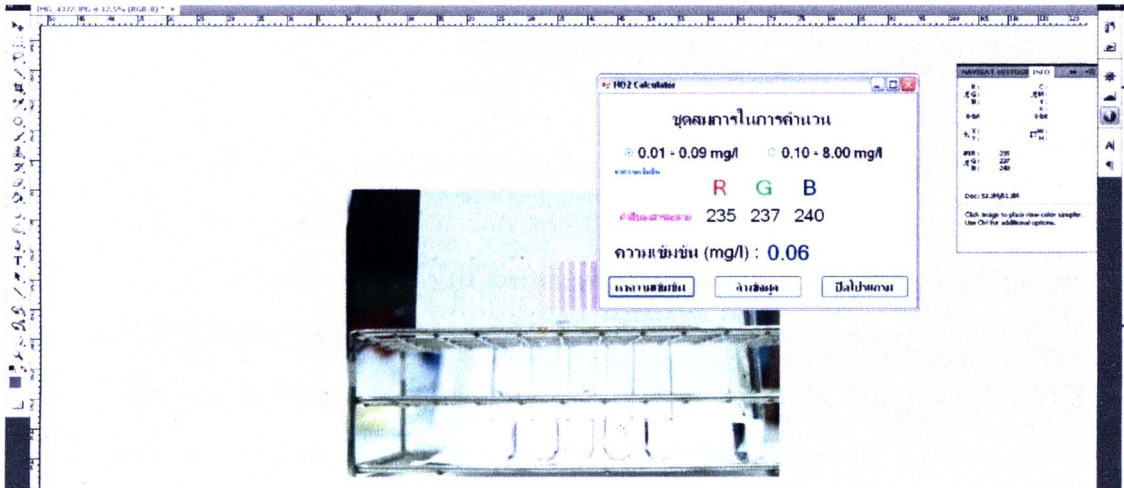
3.5 การเปรียบเทียบผลการอ่านค่าแถบสีมาตรฐานที่มีความละเอียดสูง กับ โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อคำนวณความเข้มข้นของ NO₂ จากภาพถ่าย กับ วิธีการทางสเปกโตรโฟโตเมตรี

จากการวางแผนทดสอบสำหรับการหาปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ของ Chalermrom (2008) โดย วาสนา แฟรลตี้ ณ บริเวณคูเมืองเชียงใหม่ฝั่งช้างเผือก ทั้งหมด 9 จุด จุดละ 5 หลอด รวมจำนวน 45 หลอด เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นทำการตรวจวัดค่าไนโตรเจนไดออกไซด์ด้วยวิธีการทางสเปกโตรโฟโตเมตรี หลังจากนั้นก็ใช้วิธีวัดเทียบกับแถบสีมาตรฐานที่ทำขึ้นใหม่จากการทดลองข้อที่ 2.6 และถ่ายภาพเพื่อใช้คำนวณหาความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นจากการทดลองที่ 2.7 (ภาพ 3.19) ซึ่งผู้ทำการวิจัยได้เป็นผู้ทำการทดสอบแถบสีมาตรฐานและโปรแกรมสำเร็จรูปเอง ได้ผลการทดลองตามตาราง 3.8

ตาราง 3.8 ผลการหาค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนไดออกไซด์จากการทดสอบด้วยการอ่านโดยสเปกโตรโฟโตเมตรี แถบสี NO₂ – d1 และโปรแกรมสำเร็จรูป

Study Site	Spectrophotometry	แถบสีมาตรฐานNO ₂ – d1		โปรแกรมสำเร็จรูป	
	ความเข้มข้น(ppm)	ความเข้มข้น(ppm)	ร้อยละผิดพลาด*	ความเข้มข้น(ppm)	ร้อยละผิดพลาด*
1	0.14	0.20	43	0.02	36
2	0.08	0.14	75	0.30	13
3	0.17	0.14	18	0.35	47
4	0.16	0.16	0	0.35	50
5	0.15	0.22	47	0.30	20
6	0.09	0.10	11	0.19	0
7	0.09	0.10	11	0.37	33
8	0.13	0.14	8	0.31	8
9	0.07	0.08	14	0.19	71

*เทียบกับค่าที่ได้จากการอ่านด้วยสเปกโตรโฟโตเมตรี



ภาพ 3.19 การใช้โปรแกรม NO₂ Calculator และ Photoshop หาค่าความเข้มข้นของสารละลาย NO₂

ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยของการใช้แถบสีมาตรฐาน เมื่อหาค่าเฉลี่ยทั้งหมดแล้ว พบว่ามีค่าเท่ากับ 25 นั่นก็หมายความว่ามีความถูกต้องเท่ากับ 75% ในการใช้แถบสีมาตรฐานที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ (NO₂ - d1) สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้นมาพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดใกล้เคียงกับการใช้แถบสีมาตรฐาน ซึ่งเมื่อหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทั้งหมดแล้วมีค่าเท่ากับ 31% โดยขีดจำกัดของโปรแกรมสำเร็จรูปนั้นสามารถวัดความเข้มข้นได้ต่ำที่สุดที่ 0.05ppm

ค่า NO₂ ที่นำมาทำการทดลองในตอนนี้จะเห็นได้ว่าอยู่ในช่วง 0.07-0.17 ppm ซึ่งถือได้ว่ามีความเข้มข้นต่ำ การใช้แถบสีอ่านเพื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นจากเครื่องสเปกโตรโฟโตเมตรี ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือ สามารถหาค่าความเข้มข้นได้ใกล้เคียงกับค่าการวัดของเครื่องสเปกโตรโฟโตเมตรี ส่วนทางด้านโปรแกรมมีความผิดพลาดมากกว่าเนื่องจากการถ่ายภาพให้แสงสว่างเท่ากัน และเพียงพอด้วยกันทั้งภาพเป็นสิ่งที่ต้องใส่ใจเป็นพิเศษ ค่าแสงที่เปลี่ยนเพียงน้อยนิดก็สามารถทำให้ผลของการคำนวณตามสมการเปลี่ยนแปลงไปได้มากตามไปด้วย จากการออกแบบแถบสี NO₂ - d2 จะมีส่วนของ standard color for photography ส่วนนี้เป็นตัวกำหนดสีที่ถูกต้องของสารละลายไม่ว่าสภาพแสงจากสิ่งแวดล้อมจะผิดเพี้ยนไปมากขนาดไหนก็ตามก็ยังสามารถบอกสีที่ถูกต้องได้ ซึ่งผู้ใช้งานจำเป็นต้องมีความชำนาญในการใช้โปรแกรม Photoshop CS4 อย่างไรก็ตามการใช้แถบสีสามารถตอบสนองความสะดวกสบายได้มากกว่า อีกทั้งยังสามารถบิคหลอดของสารละลายเพื่อดูสีได้ตามความถนัดของแต่ละบุคคลด้วย