บทที่ 4
ผลการวิจัย

การคัดกรองใบพืชเพื่อเป็นตัวดูดซับในการบำบัดเบนซีนในระบบกะ (batch)

จากการศึกษาเพื่อคัดกรองตัวดูดซับจากใบพืชทั้งหมด 18 ชนิด เพื่อหาใบพืชที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดเบนซีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm ภายในระบบปิดตลอดระยะเวลา 3 วัน ซึ่งผลการวัดปริมาณเบนซีนที่เหลืออยู่แสดงในตารางที่ 4.1 และ เมื่อคำนวณความความเข้มข้นของปริมาณเบนซีนที่ถูกดูดเข้าในใบไม้แต่ละชนิดอยู่ใน μmole/g of adsorbent ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจากผลการทดลองจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าใบของ *D. picta* (ใบสาวน้อยประแป้ง) *F.religiosa* (ใบโพธิ์) *L. macrocarpa* (ใบอินทนิน) *A. scholaris* (ใบตีนเป็ด) และ *A. aureum* (ใบปลงทะเล) มีประสิทธิภาพการบำบัดบำบัดเบนซีนสูงตั้งแต่วันที่ 1 ของการบำบัด โดยเมื่อพิจารณาในวันที่ 3 ของการทดลองพบว่าใบตีนเป็ดมีประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีนเข้าไปในใบสูงถึง 20.57±1.62 μmole/g of adsorbent ส่วน *D. picta F.religiosa L. macrocarpa* และ *A. aureum* มีประสิทธิภาพการดูดซับ เบนซีนเข้าไปในใบพืชเท่ากับ 19.37±0.25 , 18.33±1.12, 20.07±0.88 และ 18.9±0.54 μmole/g of adsorbent ตามลำดับ จะเห็นว่าใบพืชมีศักยภาพในการดูดซับเบนซีนได้สูง ซึ่งสอดคล้องกับ R. Kamath (2005) ที่พบว่าเบนซีนง่ายที่จะ transform เข้าไปในพืช และ Environmental Agency (2009) กล่าวว่า พืชสามารถสะสม VOCs ในใบพืชได้ และ species ของพืชเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการดูดซับเบนซีนได้สูงหรือต่ำ

ตารางที่ 4.1 การบำบัดเบนซีนของพืชทั้ง 18 ชนิด ภายในระบบทดลองแบบกะ

ชนิดใบพืช (Plants leave Species)	ปริมาณเบนซีนที่เหลือ (ppm)		
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3
H. rubescens(ใบเสน่ห์จันทร์แดง)	19.74 ± 0.00^{a}	19.73 ± 0.01^{a}	19.68 ± 0.08^{a}
C. hystrix(ใบมะกรูด)	$17.81\pm0.09^{d,e}$	$17.51\pm2.49^{c,d,e,f}$	$17.36\pm0.75^{b,c}$
M. paradisiacal(ใบตอง)	$17.41\pm0.57^{d,e,f}$	$15.63\pm0.94^{g,h}$	15.67 ± 0.32^{e}
M. indica (ใบมะม่วง)	$17.79\pm0.99^{d,e}$	$17.82\pm1.01^{b,c,d,e}$	$18.05\pm0.87^{b,c}$
C. macrolepis (ใบสน)	19.59 ± 0.05^{a}	$18.92\pm0.14^{a,b}$	18.97 ± 0.01^{a}
L. macrocarpa (ใบอินทนิน)	$16.85\pm0.15^{f,g}$	$16.38\pm0.01^{g,g,h}$	14.23 ± 0.25^{h}
C. odorata(ใบตะแบก)	$18.65\pm0.06^{b,c}$	$18.39\pm0.37^{b,c}$	18.17 ± 0.06^{b}
C. siamea (ใบขี้เหล็ก)	$18.98\pm0.09^{a,b,c}$	$18.67\pm0.31^{a,b,c}$	$17.80\pm0.04^{b,c}$
B. villea(ใบเฟื่องฟ้า)	$19.02\pm0.10^{a,b}$	$18.30\pm0.08^{b,c,d}$	$17.97\pm0.33^{b,c}$
C. grandis (ใบตำลึง)	$18.67\pm0.52^{b,c}$	$18.74\pm0.65^{a,b,c}$	$18.09\pm0.09^{b,c}$
D. picta(ใบสาวน้อยประแป้ง)	$16.91\pm0.07^{f,g}$	15.47 ± 0.04^{h}	$14.43\pm0.07^{f,g}$
A. atlas(ใบผีเสื้อ)	$19.00\pm0.10^{a,b,c}$	14.97 ± 0.13^{h}	$15.09\pm0.06^{e,f}$
P. longifolia(ใบอโศก)	$18.17\pm0.26^{c,d}$	$17.70\pm0.12^{b,c,d,e,f}$	17.30 ± 0.14^{c}

F. religiosa(ใบโพธิ์)	16.95±0.03^{f,g}	16.97±0.11^{d,e,f,g}	14.73±0.32^{f,g}
A. andraeanum(ใบหน้าวัว)	16.39±1.34^{g,h}	16.39±0.06^{f,g,h}	16.43±0.13^{d}
P. indicus(ใบประดู่)	16.01±0.72^{h}	15.40±0.80^{h}	14.88±1.24^{f,g}
A. scholaris(ใบตีนเป็ด)	17.24±0.14^{e,f}	15.90±0.10^{g,h}	14.09±0.46^{g,h}
A. aureum (ใบปลงทะเล)	16.84±0.18^{g,h}	15.81±0.15^{g,h}	14.57±0.15^{f,g}

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตารางเป็น ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และจำแนกกลุ่มโดยใช้ Duncan multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของพืชทั้ง 18 ชนิด ภายในระบบทดลองแบบกะ

ชนิดใบพืช (Plants leave Species)	**ปริมาณของเบนซีนที่ถูกดูดซับ (µmole/g of adsorbent)**		
	วันที่ 1	**วันที่ 2**	**วันที่ 3**
H. rubescens(ใบเสน่ห์จันทร์แดง)	0.92±0.01^{a}	0.94±0.02^{a}	1.1±0.28^{a}
C. hystrix(ใบมะกรูด)	7.64±0.33^{d,e}	8.66±8.70^{c,d,e,f}	9.19±2.63^{b,c}
M. paradisiacal(ใบตอง)	9.01±1.99^{d,e,f}	15.20±3.29^{g,h}	15.05±1.14^{e}
M. indica (ใบมะม่วง)	7.67±3.45^{d,e}	7.56±3.54^{b,c,d,e}	6.79±3.05^{b,c}
C. macrolepis (ใบสน)	1.42±0.19^{a}	3.75±0.52^{a,b}	3.58±0.04^{a}
L. macrocarpa (ใบอินทนิน)	10.94±0.54^{f,g}	12.59±0.03^{f,g,h}	20.07±0.88^{h}
C. odorata(ใบตะแบก)	4.67±0.23^{b,c}	5.59±1.32^{b,c}	6.36±0.24^{b}
C. siamea (ใบขี้เหล็ก)	3.52±0.34^{a,b,c}	4.63±1.11^{a,b,c}	7.66±0.17^{b,c}
B. villea(ใบเฟื่องฟ้า)	3.38±0.37^{a,b}	5.89±0.30^{b,c,d}	7.06±1.17^{b,c}
C. grandis (ใบตำลึง)	4.62±1.84^{b,c}	4.37±2.28^{a,b,c}	6.64±0.33^{b,c}
D. picta(ใบสาวน้อยประแป้ง)	10.73±0.25^{f,g}	15.77±0.17^{h}	19.37±0.25^{f,g}
A. atlas(ใบผีเสื้อ)	3.48±0.37^{a,b,c}	17.49±0.46^{h}	17.08±0.21^{e,f}
P. longifolia(ใบอโศก)	6.34±0.91^{c,d}	7.98±0.44^{b,c,d,e,f}	9.39±0.51^{c}
F. religiosa(ใบโพธิ์)	10.61±0.12^{f,g}	10.53±0.41^{d,e,f,g}	18.33±1.12^{f,g}
A. andraeanum(ใบหน้าวัว)	12.55±4.69^{g,h}	12.56±0.21^{f,g,h}	12.41±0.46^{d}
P. indicus(ใบประดู่)	13.88±2.52^{h}	16.01±2.81^{h}	17.82±4.35^{f,g}
A.scholaris(ใบตีนเป็ด)	9.61±0.52^{e,f}	14.25±0.38^{g,h}	20.57±1.62^{g,h}
A.aureum (ใบปลงทะเล)	10.97±0.63^{g,h}	14.59±0.54^{g,h}	18.9±0.54^{f,g}

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตารางเป็น ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และจำแนกกลุ่มโดยใช้ Duncan multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากผลการทดลองการคัดกรองพืชในการบำบัดเบนซีนแบบกะ (batch) ในระบบปิด ผลการทดลองพบว่า พืชทั้ง 5 ชนิด คือ *A. scholaris* (ใบตีนเป็ด) *L. macrocarpa* (ใบอินทนิน) *D. picta* (ใบสาวน้อยปะแป้ง) *A. aureum* (ใบปลงทะเล) *F.religiosa* (ใบโพธิ์) มีประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนสูง ดังนั้นจึงได้นำพืชทั้ง 5 ชนิดไปทำการทดลองดูดซับเบนซีนในระบบต่อเนื่องต่อไป

การดูดซับเบนซีนในระบบต่อเนื่องด้วยใบพืช

จากการทดลองการประยุกต์ใบพืชที่มีประสิทธิภาพดูดซับเบนซีนในระบบกะ(batch) ได้ดี 5 ชนิด คือ *A. scholaris* (ใบตีนเป็ด) *L. macrocarpa* (ใบอินทนิน) *D. picta* (ใบสาวน้อยปะแป้ง) *A. aureum* (ใบปลงทะเล) *F.religiosa* (ใบโพธิ์) โดยนำมาทดลองในระบบต่อเนื่อง (ภาพที่ 3.1) โดยป้อนเบนซีนเข้าไปในระบบความเข้มข้นที่ 55 ppm อย่างต่อเนื่อง เป็นเวลาทั้งหมด 156 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดัง ตารางที่ 4.3-4.7 และ ภาพที่ 4.1 ซึ่ง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนของ *D. picta A. aureum A. scholaris* มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ประมาณ ร้อยละ 67.61- 85.43 , 59.81-87.22 และ 63.29-86.26 ของการทดลองชั่วโมงที่ 6-84 ส่วน *L. macrocarpa* และ *F. religiosa* มีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 44.83-74.28 และ 45.02-76.65 ตามลำดับ และจะเห็นว่าในชั่วโมงที่ 132 เป็นต้นใบไม้ทั้ง 5 ชนิดสามารถบำบัดเบนซีนได้ค่อนข้างต่ำ

ตาราง 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของใบตีนเป็ด

ชั่วโมง (วัน)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	SD
6	82.03	9.07
12	71.95	2.32
18	85.58	4.89
24	75.86	12.16
30	88.75	18.53
36	61.23	8.11
42	66.43	5.44
48	58.77	10.82
54	59.81	0.74
60	71.42	6.03
66	82.61	6.33
72	87.22	4.68
78	87.22	4.68
84	79.05	6.66
90	79.41	7.12
96	53.65	4.31
102	68.57	13.25
108	71	9.56
114	71.03	10.91
120	62.13	11.97
126	16.93	0.67
132	0	0
138	0	0
144	0	0
150	0	0
156	0	0

***** ควบคุมน้ำหนักผงใบไม้ตัวดูดซับให้ได้น้ำหนัก 15 กรัม

ตาราง 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของใบอินทนิน

ชั่วโมง (วัน)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	SD
6	45.02	2.48
12	53.69	7.35
18	58.54	2.26
24	45.79	3.40
30	70.41	5.46
36	48.02	22.31
42	76.65	9.18
48	61.94	6.81
54	55.01	0.66
60	60.33	1.11
66	71.43	2.96
72	74.53	0.93
78	74.53	0.93
84	68.83	13.084
90	62.20	11.63
96	43.91	1.18
102	25.78	3.08
108	3.67	11.73
114	5.04	3.84
120	12.62	0.79
126	10.00	1.30
132	11.00	6.04
138	0	0
144	0	0
150	0	0
156	0	0

***** ควบคุมน้ำหนักผงใบไม้ตัวดูดซับให้ได้น้ำหนัก 15 กรัม

ตาราง 4.5 ประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของใบสาวน้อยปะแป้ง

ชั่วโมง (วัน)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	SD
6	78.59	11.90
12	82.60	5.72
18	67.61	3.43
24	68.70	3.25
30	85.43	7.93
36	84.56	10
42	77.76	16.27
48	84.73	12.52
54	76.70	14.92
60	72.44	7.73
66	88.33	4.38
72	80.32	7.77
78	80.32	7.77
84	85.81	13.48
90	72.13	2.40
96	65.84	0.97
102	48.82	0.20
108	22.05	16.47
114	23.88	1.41
120	7.30	5.61
126	7.30	5.61
132	8.82	1.07
138	0	0
144	0	0
150	0	0
156	0	0

***** ควบคุมน้ำหนักผงใบไม้ตัวดูดซับให้ได้น้ำหนัก 15 กรัม

ตาราง 4.6 ประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของใบปรงทะเล

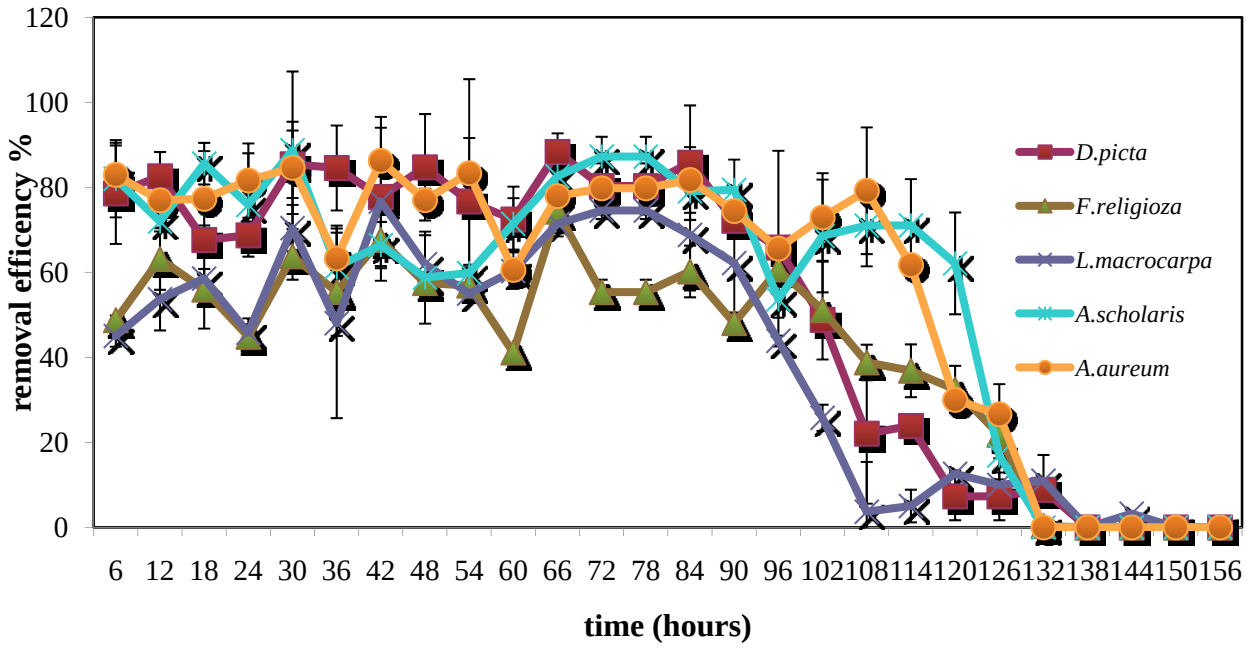
ชั่วโมง (วัน)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	SD
6	82.94	6.93
12	76.95	6.38
18	77.31	11.22
24	81.61	8.73
30	84.59	10.85
36	63.29	7.72
42	86.26	10.32
48	77.00	2.69
54	83.32	22.13
60	60.58	4.44
66	77.95	8.77
72	79.77	5.88
78	79.77	5.88
84	81.75	7.73
90	74.44	4.77
96	65.59	23.01
102	72.93	10.40
108	79.21	14.89
114	61.73	2.27
120	30	1.02
126	26.63	0.28
132	0	0
138	0	0
144	0	0
150	0	0
156	0	0

***** ควบคุมน้ำหนักผงใบไม้ตัวดูดซับให้ได้น้ำหนัก 15 กรัม

ตาราง 4.7 ประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของใบโพธิ์

ชั่วโมง (วัน)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	SD
6	48.76	1.10
12	63.15	7.24
18	55.96	9.17
24	44.83	2.96
30	63.79	5.50
36	55.40	10.34
42	67.63	9.59
48	57.48	0.69
54	56.90	3.79
60	41.16	1.97
66	74.28	2.41
72	55.34	2.93
78	55.34	2.93
84	60.21	6.07
90	48.09	2.35
96	60.69	5.74
102	51.12	11.61
108	38.80	4.18
114	36.85	6.21
120	32.46	5.55
126	21.78	11.92
132	0.32	0.39
138	0	0
144	0	0
150	0	0
156	0	0

***** ควบคุมน้ำหนักผงใบไม้ตัวดูดซับให้ได้น้ำหนัก 15 กรัม



ภาพที่ 4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน (%) ด้วยใบพืชชนิดต่างๆ ในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง (continuous system)

กลไกการดูดซับเบนซีนด้วยใบพืช

1) การแยกชะ (desorption)

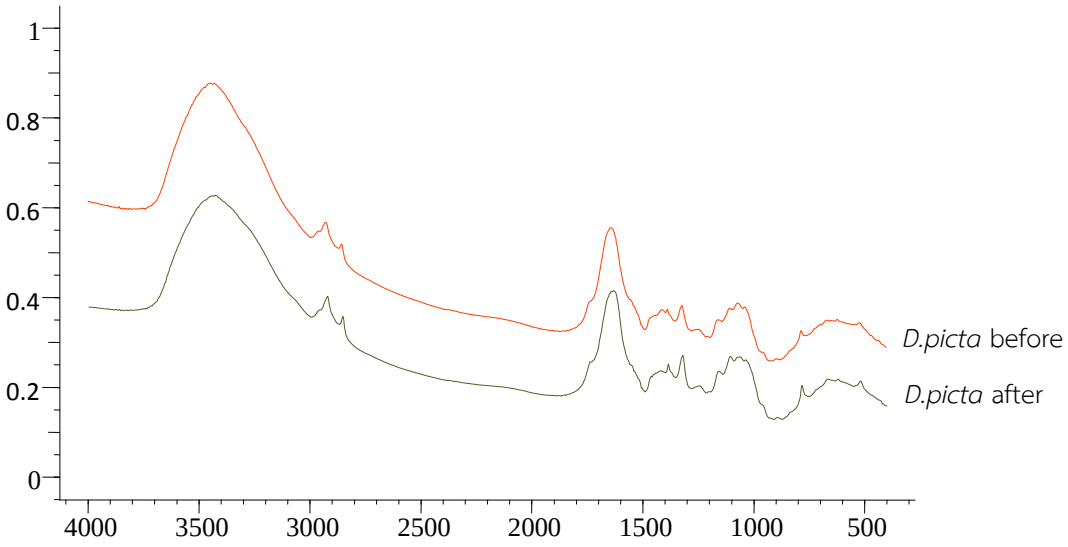
การศึกษาประสิทธิภาพการแยกชะเบนซีนจากใบพืชชนิดต่างๆด้วยเฮกเซน ผลการศึกษาพบว่าเบนซีนสามารถแยกชะได้มากกว่าร้อยละ 99 ของใบพืช *D. picta*, *A. aureum* , *L. macrocarpa*, *L. macrocarpa* และ *F.religiosa* ส่วนใบ *A. scholaris* สามารถแยกชะได้ร้อยละ 83.11 ซึ่งจะเห็นว่าใบพืชเหล่านี้มีประสิทธิภาพการแยกชะสูง ซึ่งกลไกการดูดซับน่าจะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการแยกชะ (desorption) ของเบนเซนจากใบไม้

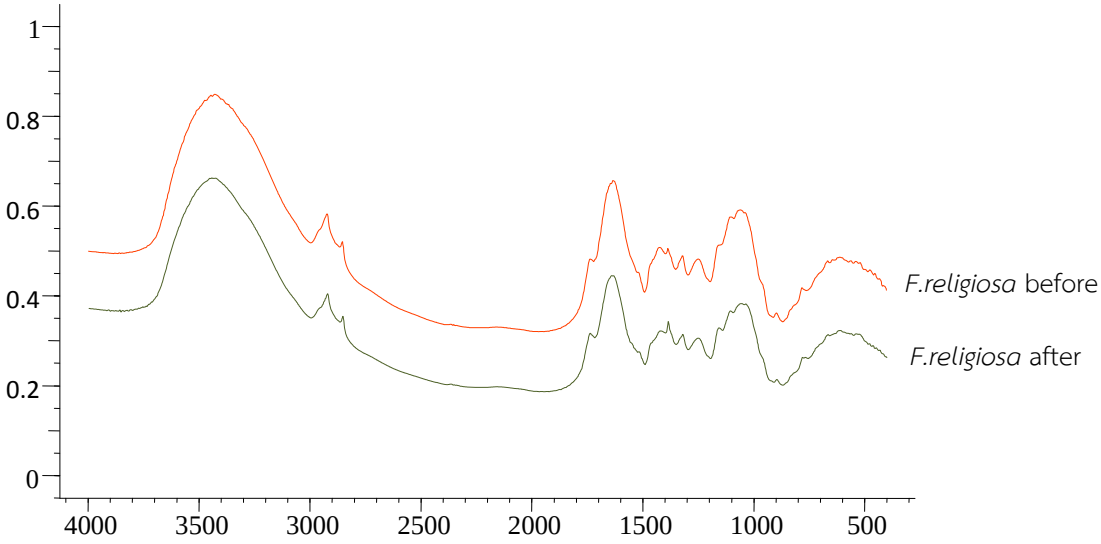
ชนิดของใบพืช	% การแยกชะ (desorption)
D. picta	>99.5
A. aureum	>99.5
A. scholaris	83.11
L. macrocarpa	>99.5
F.religiosa	>99.5

2) การศึกษาหมู่ฟังชั่นด้วย FTIR

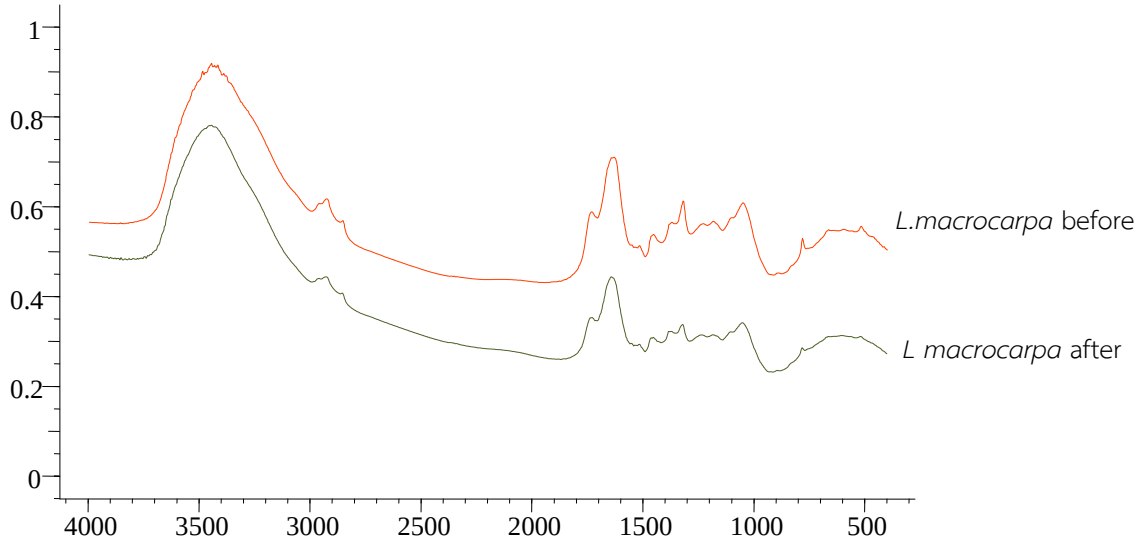
ผลของ FTIR ก่อนและหลังการดูดซับเบนซีนด้วยใบพืช แสดงดังภาพที่ 4.2



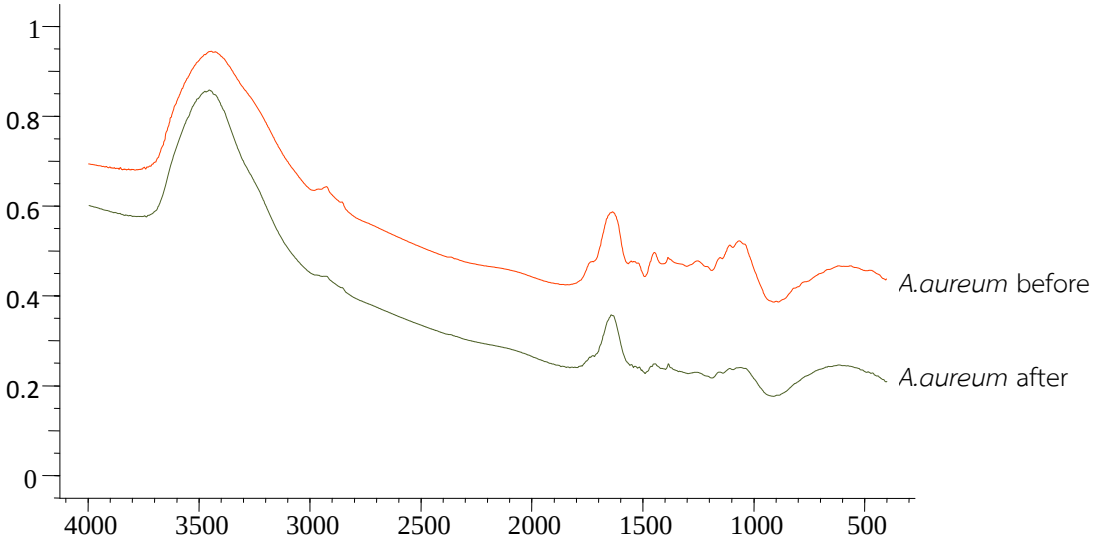
a) *D.picta*



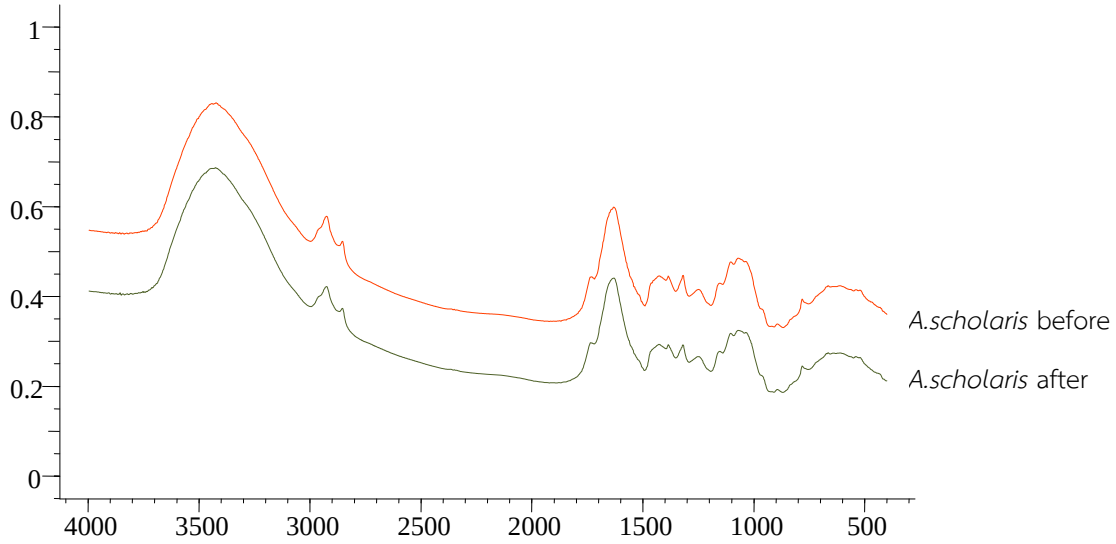
b) *F.religiosa*



c) *L.macrocarpa*



d) *A.aureum*



e) *A.scholaris*

ภาพที่ 4.2 FTIR ของใบพืชชนิดต่างๆ ก่อนและหลังดูดซับ

จากภาพที่ 4.2 แสดงหมู่ฟังชั่นของใบพืชก่อนและหลังดูดซับเบนซีน ซึ่งผลการทดสอบ FTIR ของใบพืชก่อนดูดซับเบนซีน พบว่าหมู่ O-H ที่ตำแหน่งพีค (peak) ประมาณ 3400 ต่อเซนติเมตร และหมู่ C-H ที่ตำแหน่งพีค 2920 และยังพบพีคของ C=O ที่ตำแหน่ง 1735 ต่อเซนติเมตร และ C=C ที่ตำแหน่ง 1614 ต่อเซนติเมตร และหมู่ methoxy ($O\text{-}CH_3$) ถูกพบที่ตำแหน่ง 1447 ต่อเซนติเมตร นอกจากนี้พบ หมู่ O-H deformation มาจากหมู่ phenolic group และ พบ primary alcohol และ secondary alcohol ,C-OH ที่ตำแหน่ง 1059 และ 1104 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนหมู่ฟังชั่นของใบพืชหลังดูดซับพบว่าไม่แตกต่างจากก่อนดูดซับ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ากลไกการดูดซับเบนซีนในใบพืชเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแว็กซ์(wax) กับประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของใบพืช

จากการศึกษาปริมาณ wax ในพืชทั้ง 18 ชนิด กับ ประสิทธิภาพในการ บำบัดเบนซีน(ตารางที่ 4.9) พบว่าปริมาณ wax ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ใบพืชมีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนสูงขึ้น เช่น *A. scholaris* *A.aureum* *D. picta* มีปริมาณ wax 0.11 ±0.01 , 0.10 ± 0.00^{d} และ 0.25±0.01 mg/g of adsorbent ตามลำดับ ซึ่งพืชเหล่านี้ค่อนข้างมี wax สูงเมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น และพบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนสูงถึง20.57±1.62 18.9±0.54 19.37±0.25 µmole/g of adsorbent แต่อย่างไรพืชบางชนิด มีปริมาณ wax เท่ากัน เช่น *C. hystrix* (ใบมะกรูด) *M. paradisiacal l*(ใบตอง) แต่ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนต่างกัน คือ 9.19±2.63 และ 15.05±1.14 µmole/g of adsorbent สำหรับ *C. hystrix* (ใบมะกรูด) และ *M. paradisiacal* ตามลำดับ และใบพืชบางชนิด มีปริมาณ wax สูง เช่นใบ *A. andraeanum*(ใบหน้าวัว) แต่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนต่ำกว่า *A .scholaris* และ *A.aureum* ทั้งๆ ที่มีปริมาณ *wax* มากกว่า ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ปริมาณ wax ในใบพืช น่าจะเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนในใบพืช ซึ่งอาจจะมีปัจจัยอื่นๆ อีกเช่น องค์ประกอบของ wax ที่แตกต่างกันของพืชแต่ละชนิด (Devi Ugrekhelidze , 1996) ซึ่งอาจต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักwax ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของใบพืช 18 ชนิด

ชนิดใบพืช (Plants leaves Species	**น้ำหนักแว็กซ์** (mg/g of adsorbent)	**ปริมาณของเบนซีนที่ถูกดูดซับ** (µmole/g of adsorbent)
H. rubescens(ใบเสน่ห์จันทร์แดง)	0.01±0.00 [a]	1.1±0.28[a]
C. hystrix(ใบมะกรูด)	0.06±0.01 [b,c]	9.19±2.63[b,c]
M. paradisiacal(ใบตอง)	0.06±0.02 [b,c]	15.05±1.14[e]
M. indica (ใบมะม่วง)	0.05±0.00 [b,c]	6.79±3.05[b,c]
C. macrolepis (ใบสน)	0.01±0.00 [a]	3.58±0.04[a]
L. macrocarpa (ใบอินทนิน)	0.18±0.03 [g]	20.07±0.88[h]
C. odorata(ใบตะแบก)	0.04±0.01 [b]	6.36±0.24[b]
C. siamea (ใบขี้เหล็ก)	0.16±0.04 [f]	7.66±0.17[b,c]
B. villea(ใบเฟื่องฟ้า)	0.05±0.00 [b,c]	7.06±1.17[b,c]
C. grandis (ใบตำลึง)	0.05±0.00 [b,c]	6.64±0.33[b,c]
D. picta(ใบสาวน้อยประแป้ง)	0.25±0.01 [h]	19.37±0.25[f,g]
A. atlas(ใบผีเสื้อ)	0.10±0.00 [d]	17.08±0.21[e,f]
P. longifolia(ใบอโศก)	0.07±0.01 [c]	9.39±0.51[c]
F.religiosa(ใบโพธิ์)	0.10±0.00 [d]	18.33±1.12[f,g]
A. andraeanum(ใบหน้าวัว)	0.14±0.02 [e]	12.41±0.46[d]
P. indicus(ใบประดู่)	0.10±0.02 [d]	17.82±4.35[f,g]
A.scholaris(ใบตีนเป็ด)	0.11 ±0.01 [d]	20.57±1.62 [g,h]
A.aureum (ใบปลงทะเล)	0.10±0.00[d]	18.9±0.54 [f,g]