สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 การตรวจเอกสาร	1
1.3 วัตถุประสงค์	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	6
2. ทฤษฎี	7
2.1 ทฤษฎีและหลักการทำงาน	7
2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	8
2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์อัลตราโซนิก	10
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง	15
3. วิธีการวิจัย	22
3.1 ระเบียบวิธีการวิจัย	22
4. ผลและวิจารณ์ผล	29
4.1 การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1 เพื่อศึกษาค่าความแข็งตึงของคานโค้ง	29
4.2 การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 เพื่อศึกษาขนาดของวัสดุดูดซับแรงกระแทก	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 เพื่อหารูปแบบการจัดวาง
ตัวทำงานที่สามารถกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดตั้งเฉพาะผิวด้านบนของคานโค้ง 35

4.4 การจำลองแบบมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง
โดยใช้ตัวทำงานชนิดโพลิเมอร์ [PVDF] 37

4.5 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 38

4.6 ผลการจำลองแบบมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง
ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 50

4.7 การวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ (harmonic response) 64

5. บทสรุป 72

5.1 หัวข้อของการวิจัย 72

5.2 สรุปผล 73

5.3 การเปรียบเทียบผลจากลักษณะการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้ง 74

5.4 ข้อเสนอแนะ 77

5.5 การประยุกต์ใช้งานมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง 77

เอกสารอ้างอิง 78

ภาคผนวก 83

ประวัติผู้เขียน 95

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของวัสดุกรณีใช้ตัวทำงาน PZT-4	25
3.2 คุณสมบัติของวัสดุกรณีใช้ตัวทำงาน PVDF	26
4.1 แสดงความถี่ธรรมชาติของลักษณะที่ 1 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	70
4.2 แสดงความถี่ธรรมชาติของลักษณะที่ 1ด้วยวิธคณิตศาสตร์	70
4.3 แสดงความถี่ธรรมชาติของลักษณะที่ 2	71
4.4 แสดงความถี่ธรรมชาติของลักษณะที่ 3	71
5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองมอเตอร์ อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	75
5.2 แสดงการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองมอเตอร์ อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งที่ได้จากแบบจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	76

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 รูปแบบการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1 ของ Ueha et al., 1993	2
1.2 รูปแบบการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 ของ Ueha et al., 1993	2
1.3 ลักษณะการจัดวางตัวทำงานของ Smithmaitrie et al., 2005	3
1.4 ลักษณะการจัดวางตัวทำงานของ Richter et al., 2004	4
1.5 ลักษณะการจัดวางตัวทำงานของ Bal and Bekiroglu, 2003	5
2.1 a) แสดงลักษณะของโดเมนที่ยังไม่ได้ทำการโพลิง b) แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของโดเมนหลังการโพลิง (poling)	7
2.2 a) แสดงทิศทางของโดเมน b) แท่งเพียโซอิเล็กทริกจะหดตัวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าลบ c) แท่งเพียโซอิเล็กทริกจะยืดตัวตัวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าบวก d) แท่งเพียโซอิเล็กทริกจะยืดตัวเมื่อถูกดึง และปลดปล่อยไฟฟ้าออกมา e) แท่งเพียโซอิเล็กทริกจะหดตัวเมื่อถูกกดและปลดปล่อยไฟฟ้าออกมา f) แสดงสัญญาณไฟฟ้าที่ออกจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อถูกแรงกระทำ	8
2.3 แสดงส่วนประกอบหลักของมอเตอร์อัลตราโซนิก	10
2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของอัลตราโซนิกแบบหมุน	11
2.5 a) แสดงลักษณะการจัดวางตัวทำงานบนสเตเตอร์ของอัลตราโซนิกแบบหมุน b) แสดงลักษณะการเกิดคลื่นเคลื่อนที่บนมอเตอร์อัลตราโซนิกแบบหมุน	12
2.6 แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์อัลตราโซนิกแบบเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง	12
2.7 แสดงโครงสร้างและลักษณะการเกิดคลื่นเคลื่อนที่ของมอเตอร์อัลตราโซนิกแบบเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรง	13
2.8 แสดงลักษณะและขนาดของคานโค้ง	14
2.9 แสดงแรงและโมเมนต์ที่เกิดในทิศทาง α_1 , α_2 และ α_3	14
2.10 แสดงทิศทาง ϕ และทิศทาง 3 ของอัลตราโซนิกมอเตอร์เชิงเส้นโค้ง	16
3.1 แสดงขั้นตอนของการวิจัย	22
3.2 ขั้นตอนการจำลองแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	24
3.3 แสดงขั้นตอนของการแสดงผลของการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	28

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.1 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 1	29
4.2 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 2	30
4.3 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 3	30
4.4 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 4	31
4.5 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 1 รูปแบบที่ 5	31
4.6 แสดงลักษณะการกระตุ้นไฟฟ้าบนตัวทำงานลักษณะที่ 1	32
4.7 แสดงการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 และวัสดุดูดซับแรงกระแทกแบบที่ 1	33
4.8 แสดงการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 และวัสดุดูดซับแรงกระแทกแบบที่ 2	34
4.9 แสดงการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2 และวัสดุดูดซับแรงกระแทกแบบที่ 3	34
4.10 แสดงลักษณะการกระตุ้นไฟฟ้าบนตัวทำงานลักษณะที่ 2	35
4.11 แสดงการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งลักษณะที่ 3	36
4.12 แสดงลักษณะการกระตุ้นไฟฟ้าบนตัวทำงานลักษณะที่ 3	36
4.13 a) แสดงคานโค้งที่ติดตัวทำงานชนิด PVDF b) แสดงการติดตัวทำงานและวัสดุดูดซับแรงกระแทก	37
4.14 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 18102 Hz	38
4.15 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 50000 Hz	39
4.16 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ 12500 Hz	40
4.17 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ 33200 Hz	40
4.18 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ 13460 Hz	41
4.19 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ 32400 Hz	42
4.20 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 4 ที่ความถี่ 13600 Hz	43
4.21 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 4 ที่ความถี่ 35800 Hz	43
4.22 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 5 ที่ความถี่ 14000 Hz	44
4.23 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำงานรูปแบบที่ 5 ที่ความถี่ 37200 Hz	45
4.24 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 17500 Hz	46
4.25 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 42000 Hz	46

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.26 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 17300 Hz	47
4.27 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 32800 Hz	48
4.28 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 6600 Hz	49
4.29 คลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นด้วยความถี่ 14200 Hz	50
4.30 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 18102 Hz	51
4.31 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ 47000 Hz	51
4.32 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ 14320 Hz	52
4.33 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 2 ความถี่ 35400 Hz	53
4.34 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ 15050 Hz	54
4.35 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ 34000 Hz	54
4.36 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 4 ที่ความถี่ 16005 Hz	55
4.37 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 4 ที่ความถี่ 42600 Hz	56
4.38 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 5 ที่ความถี่ 16550 Hz	57
4.39 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อติดตั้งตัวทำงานรูปแบบที่ 5 ที่ความถี่ 41750 Hz	57
4.40 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ทำงาน 12580 Hz	58
4.41 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 1 ที่ความถี่ทำงาน 32550 Hz	59
4.42 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ทำงาน 12580 Hz	59
4.43 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 2 ที่ความถี่ทำงาน 32550 Hz	60
4.44 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ทำงาน 12580 Hz	60
4.45 แสดงคลื่นเคลื่อนที่เมื่อติดวัสดุดูดซับแรงกระแทกรูปแบบที่ 3 ที่ความถี่ทำงาน 32550 Hz	61
4.46 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 ที่ความถี่ทำงาน 19900 Hz	62
4.47 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3 ที่ความถี่ทำงาน 29010 Hz	62
4.48 ผลการจำลองแบบเมื่อใช้ตัวทำงาน PVDF ความถี่ทำงานเท่ากับ 17000 Hz	63
4.49 ผลการจำลองแบบเมื่อใช้ตัวทำงาน PVDF ความถี่ทำงานเท่ากับ 26800 Hz	64
4.50 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 1	66
4.51 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 2	68
4.52 แสดงผลตอบสนองต่อความถี่กระตุ้นของการจัดวางตัวทำงานลักษณะที่ 3	69

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

D	electric displacement
T	mechanical stress
S	mechanical strain
E	electric field
d	piezoelectric coefficient
s^E	elastic constant
ε^T	permittivity
A	amplitude
b	width
A_1, A_2	Lame parameter
ds	infinitesimal distance
f_k	the k^{th} natural frequency
F_k	modal control force
h	shell thickness
D	bending stiffness
k	modal number
k_{ij}	bending strain
M_{ij}	bending moment
N_{ij}	membrane force
K	membrane stiffness
N_k	coefficient in distributed control force
q_i	external excitation
Q_{i3}	transverses shear stress
R	radius
R_1, R_2	radii of curvatures
s_{ij}^o	membrane strain
$\hat{T}_k$	modal control force component
t	time
u_i	displacement

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

u_s	unit step function
U_i	mode shape
Y	modulus of elasticity
Y_p	modulus of elasticity of actuator
Y_{stator}	modulus of elasticity of the stator material
α_i	spatial coordinates (i=1,2,3)
ϕ	angle
ϕ^a	actuator control force
η_k	modal participation factor
ρ	mass density
λ	wave length
μ	Poisson's ratio
ω	frequency
ω_k	the k-th natural frequency