

เทคโนโลยีแปรผันกำลังอัดต่อเนื่อง พร้อมแล้วสำหรับเครื่องยนต์ยุคต่อไป Continuous Variable Compression Ratio Technology for Next Generation Engine

นนทวัฒน์ เจนภูมิศาสตร์^{1*}

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพสูงทำได้หลายวิธี วิธีการหนึ่งที่มีการยอมรับอย่างกว้างขวางในเรื่องของประสิทธิภาพและสมรรถนะ คือ ระบบเปลี่ยนกำลังอัดต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง (แบบเป็นขั้น) แนวคิดนี้ไม่ใช่ของใหม่แต่ยังไม่พร้อมในการผลิตเนื่องจากปัญหาของรูปแบบกลไกที่ยังมีจุดที่ต้องแก้ไข เช่น น้ำหนักมาก แรงเฉื่อยมาก สะสมความร้อน ไม่ทนทาน ชิ้นส่วนมากเกินไป สั่นสะเทือน การรั่วไหลของน้ำมันเครื่อง การใช้พลังงาน ความแม่นยำ ความเชื่อถือได้ การสร้างปัญหาให้กับชิ้นส่วนอื่นที่ทำงานร่วมกันและต้นทุน เป็นต้น ปัจจุบันมีสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับระบบนี้มากกว่า 250 สิทธิบัตรทั่วโลก ดังนั้น ในบทความนี้จะกล่าวถึงที่มาของการค้นหาเทคโนโลยีดังกล่าว การจำแนกหมวดหมู่ของกลไก การวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียและสรุปรูปแบบกลไกที่มีศักยภาพสูงสุดที่พร้อมแล้วสำหรับสายการผลิตในเครื่องยนต์สมัยใหม่รุ่นต่อไป

Abstract

Continuous and Discontinuous (Stepwise) Variable Compression Ratio Engine is one of the most widely acceptable methods in terms of efficiency and performance. Even though this method was not new, it is still not ready for manufacturing due to many mechanical drawbacks, such as heavy weight, high inertia force, heat accumulation, too many component parts, vibration, leakage of engine oil, high energy consumption, low precision, unreliability, causes of problems for other parts that work together, and high cost. Today, there are more than 250 patents worldwide that relate to this system. Thus, this paper presents the background of this technology, mechanism categories, analysis of strength and weakness, and summary of highest potential mechanism pattern for line production of new generation engines.

คำสำคัญ : เครื่องยนต์แปรผันกำลังอัดต่อเนื่อง

Keywords: Continuous Variable Compression Ratio Engine

1. บทนำ

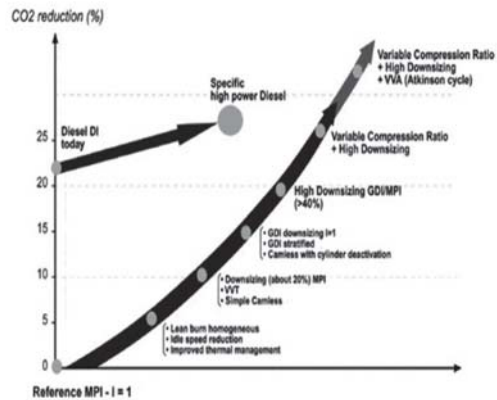
การพัฒนาเครื่องยนต์ให้มีสมรรถนะสูงขึ้นทำได้ทุกชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ วิธีที่ง่ายที่สุด คือการใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา การลดแรงเสียดทาน การลดมวลของวัสดุด้วยการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสม การปรับแต่งเครื่องยนต์ให้เหมาะกับการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การออกแบบเชิงกลมักมีข้อจำกัด เช่น ไม่สามารถเปลี่ยนสัดส่วนได้อย่างต่อเนื่อง เช่น ปริมาตรกระบอกสูบของเครื่องยนต์หนึ่งจะประกอบด้วย ความกว้างของลูกสูบคูณกับระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ถ้าต้องการให้ได้แรงบิดที่ดี ควรออกแบบให้มีความกว้างของลูกสูบน้อยและมีระยะการเคลื่อนที่ของลูกสูบมากผลที่ได้ คือ เครื่องยนต์มีแรงบิดดี แต่ผลเสีย คือ รอบเครื่องยนต์จะไม่สูงมาก เนื่องจากเกิดแรงเสียดทานจากการเคลื่อนที่ที่มากเกินไป

จากตัวอย่างดังกล่าว พบว่า เครื่องกลที่ออกแบบมาแบบปรับค่าไม่ได้มักจะตอบสนอง “พฤติกรรมทางธรรมชาติ” ไม่ได้ทั้งหมด จึงเป็นที่มาของเครื่องกลที่ปรับเปลี่ยนได้ซึ่งอาจปรับเปลี่ยนแบบเป็นขั้นหรือแบบต่อเนื่องขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าเครื่องยนต์มีการพัฒนาเชิงสมรรถนะและประสิทธิภาพในหลายด้าน เช่น การลดขนาดของเครื่องยนต์ การใช้ระบบวาล์วไอดีและวาล์วไอเสียแบบแปรผัน ทั้งแบบเป็นขั้นและแบบต่อเนื่อง และจากการคาดการณ์เทคโนโลยีเป้าหมายต่อไป คือ เครื่องยนต์ที่ประกอบด้วย ระบบวาล์วไอดีและวาล์วไอเสียแบบแปรผันได้ การลดขนาดของเครื่องยนต์และเทคโนโลยีที่เพิ่มขึ้นมา คือ ระบบแปรผันกำลังอัดได้

เทคโนโลยี ระบบแปรผันกำลังอัดได้ในปัจจุบันมีผู้จดทะเบียนสิทธิบัตรไว้เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม สิทธิบัตรดังกล่าวก็ยังไม่พร้อมที่จะนำมาใช้ เนื่องจากปัญหาความสมบูรณ์ของรูปแบบและต้นทุนเป็นหลัก

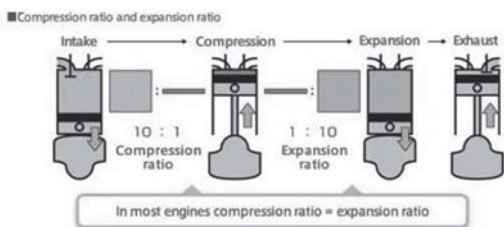
ดังนั้น ในบทความนี้จะกล่าวถึง ที่มาของเทคโนโลยีแปรผันกำลังอัด การแบ่งประเภท รวมถึงการวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียและสรุปรูปแบบที่มีศักยภาพสูงสุด ที่พร้อมจะนำมาใช้กับเครื่องยนต์ยุคต่อไป



รูปที่ 1 ลำดับการพัฒนาเครื่องยนต์และการคาดการณ์ ที่มา: <http://www.vcr-i.com/>

2. อัตราส่วนกำลังอัด

กำลังอัดในเครื่องยนต์ เป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการให้กำลังของเครื่องยนต์ ยังมีกำลังอัดมากเครื่องยนต์ก็ยังมีกำลังมาก แต่เมื่อมีกำลังอัดมากเกินไปเครื่องยนต์จะเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงเกิดเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นก๊าซพิษและเกิดการชิงจุดระเบิดก่อนซึ่งเป็นสาเหตุของการน็อกได้



รูปที่ 2 แผนภาพอัตราส่วนกำลังอัดในเครื่องยนต์
ที่มา: <http://www.mechanical-engineeringblog.com>

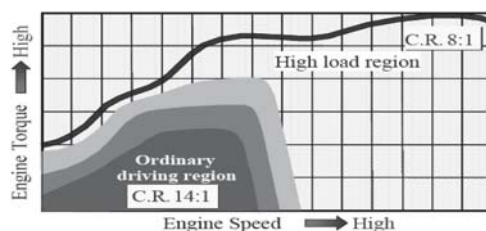
อัตราส่วนกำลังอัดหาได้จาก ปริมาตรกระบอกสูบสูงสุดหารด้วยปริมาตรกระบอกสูบต่ำสุด ปริมาตรกระบอกสูบสูงสุด ประกอบด้วย ปริมาตรที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบรวมกับปริมาตรห้องเผาไหม้ ส่วนปริมาตรกระบอกสูบต่ำสุด คือ ปริมาตรห้องเผาไหม้เพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2

ยกตัวอย่างเช่น ปริมาตรของห้องเผาไหม้มี 1 ส่วน และปริมาตรของกระบอกสูบลูกสูบมี 9 ส่วน ดังนั้น กำลังอัดของเครื่องยนต์นี้ คือ 10 ต่อ 1

ถึงแม้ว่าเครื่องยนต์จะมีกำลังอัด 10 ต่อ 1 แต่ปริมาณของอากาศที่เครื่องยนต์ดูดเข้าไป จะมีจำนวนเท่าที่ผู้ขับขี่กำหนด ดังนั้น ในช่วงความเร็วต่ำ อากาศจะไหลเข้ากระบอกสูบน้อยตามไปด้วย หมายความว่า มวลอากาศจะไม่ถูกอัดในอัตราส่วน 10 ต่อ 1 แม้ว่าเครื่องยนต์จะยังคงมีกำลังอัด 10 ต่อ 1 ก็ตาม

การแก้ไขปัญหาคือ เพิ่มกำลังอัดของเครื่องยนต์ให้สูงกว่าปกติในช่วงความเร็วต่ำ (อากาศน้อยต้องการสัดส่วนการอัดมาก) และลดกำลังอัดของเครื่องยนต์ลงเมื่อใช้ความเร็วมากขึ้น (อากาศมากต้องการสัดส่วนการอัดลดลง) ดังรูปที่ 3

จากปัญหาที่กล่าวข้างต้นสามารถแก้ไขได้ด้วยเทคโนโลยีแปรผันกำลังอัดแต่มีอุปสรรคที่สำคัญ คือ รูปแบบของกลไกที่เชื่อถือได้ สามารถทำงานได้อย่างไม่มีปัญหาและราคาไม่แพง



รูปที่ 3 การแปรผันกำลังอัดตามภาระและความเร็ว
ที่มา: SAE Paper No. 2007-01-3547

3. ระบบกลไกแปรผันกำลังอัดต่อเนื่อง

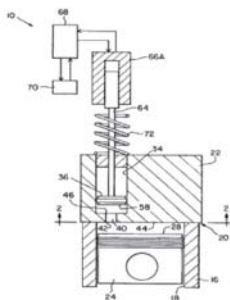
กลไกแปรผันกำลังอัดต่อเนื่องในปัจจุบัน มีผู้ที่จดทะเบียนทรัพย์สินทางปัญญามากกว่า 250 สิทธิบัตร ผู้เขียนจึงแบ่งเป็นหมวดหมู่ โดยการอ้างอิงจากชิ้นส่วนหลักและยกตัวอย่างสิทธิบัตรที่เข้าใจได้ง่าย ดังนี้

3.1 ฟลูป

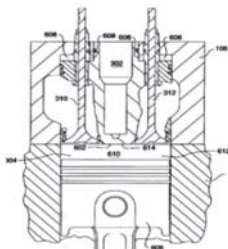
การเพิ่มและลดกำลังอัดวิธีแรก คือ การสร้างห้องเผาไหม้ขนาดเล็กภายในฟลูป โดยมีส่วนทำของห้องเผาไหม้เป็นตัวควบคุมปริมาตรหรือกำลังอัด ดังรูปที่ 4

ข้อดี มีอุปกรณ์น้อยชิ้นและติดตั้งง่าย

ข้อเสีย การมีห้องเผาไหม้และทางเข้าห้องเผาไหม้ขนาดเล็กทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ก่อมลพิษ มีไอเสียตกค้าง สะสมความร้อนและมีการรั่วไหลของกำลังผ่านทางส่วนท้ายของกระบอกปรับปริมาตร



รูปที่ 4 การสร้างห้องเผาไหม้ขนาดเล็ก
ที่มา: Patent No. US6,708,655B2



รูปที่ 5 การสร้างห้องเผาไหม้เคลื่อนที่
ที่มา: Patent No. US2004/0159292A1

จากรูปที่ 5 การเพิ่มและลดกำลังอัดโดยให้ชุดวาล์วไอดี วาล์วไอเสีย และหัวเทียนเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน

ข้อดี ไม่เปลี่ยนรูปทรงเรขาคณิตของห้องเผาไหม้

ข้อเสีย การรั่วไหลของกำลังผ่านชุดเคลื่อนที่รอยต่อท่อไอดีและท่อไอเสียไม่ตรงกัน เกิดความต้านทานการไหลทำให้อากาศไหลเข้าและไหลออกได้ไม่ดี

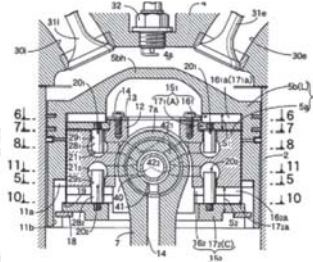
3.2 ลูกสูบ

การเพิ่มและลดกำลังอัดวิธีที่สอง คือ การสร้างลูกสูบสองชั้น ลูกสูบชั้นนอกจะเหมือนกับ

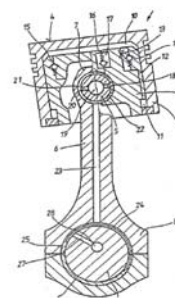
ลูกสูบทั่วไป และลูกสูบชั้นในจะยึดติดกับก้านสูบ ลูกสูบชั้นในจะได้รับแรงดันน้ำมันเครื่องผ่านก้านสูบและเพลาช้อเหวี่ยงเพื่อยกลูกสูบชั้นนอกอีกทีหนึ่ง ดังรูปที่ 6 และ 7

ข้อดี ไม่เปลี่ยนรูปทรงเรขาคณิตของห้องเผาไหม้

ข้อเสีย ปรับได้สองระดับ คือ ระดับยกสูงสุดและต่ำสุด มีมวลเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น การสะสมความร้อน และความไม่แม่นยำของตำแหน่ง



รูปที่ 6 การสร้างลูกสูบสองชั้น
ที่มา: Patent No. US6,966,282B2

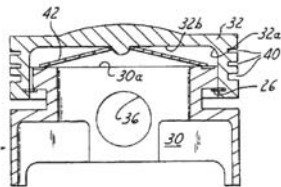


รูปที่ 7 ทางเดินของน้ำมันเครื่องจากเพลาช้อเหวี่ยง
ที่มา: Patent No. 4,784,093

การสร้างลูกสูบ 2 ชั้น อีกแบบหนึ่งซึ่งไม่ใช่แรงดันน้ำมันเครื่องในการเพิ่มหรือลดกำลังอัด คือ การใช้สปริงคั่นระหว่างลูกสูบชั้นนอกและชั้นใน ดังรูปที่ 8

ข้อดี มีโครงสร้างง่าย ต้นทุนต่ำ

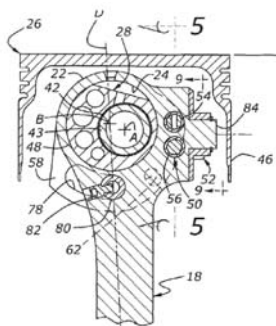
ข้อเสีย ความไม่แม่นยำของตำแหน่ง การสะสมความร้อน เกิดการกระแทกของลูกสูบชั้นใน และชั้นนอกขณะจุดระเบิดและการส่งกำลังขณะจุดระเบิดเนื่องจากการยุบตัวของลูกสูบชั้นนอก



รูปที่ 8 การสร้างลูกสูบสองชั้น (สปริง)

ที่มา: Patent No. 5,755,192

3.3 สลักลูกสูบ



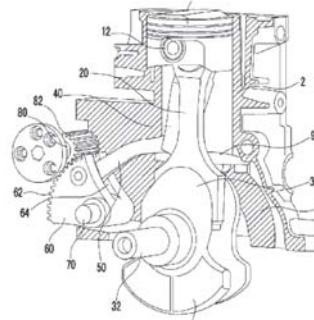
รูปที่ 9 การใช้สลักลูกสูบยกลูกสูบ

ที่มา: Patent No. US7,533,638B1

สลักลูกสูบที่ใช้ยกลูกสูบจะมีลักษณะเป็นจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง กำลังในการยกลูกสูบจะได้รับการดึงและดันของก้านสูบขณะที่เพลาคือข้อเหวี่ยงหมุน ดังรูปที่ 9

ข้อดี มีชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ข้อเสีย การส่งกำลังจากลูกสูบไปยังสลักลูกสูบถูกเหวี่ยงออกไปจากศูนย์กลาง ทำให้เกิดการเอียงตัวของลูกสูบขณะเคลื่อนที่ สะสมความร้อนและปรับได้สองระดับ



รูปที่ 10 การใช้สลักลูกสูบยกลูกสูบ (แขนต่อโยง)

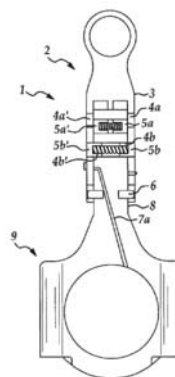
ที่มา: Patent No. US2012/0125297A1

สลักลูกสูบที่ใช้ยกลูกสูบจะมีลักษณะเป็นจุดหมุนเยื้องศูนย์กลางที่มีแขนต่อโยงและยึดตำแหน่งยกสูงสุดและต่ำสุดกับเสื้อสูบ กำลังในการยกลูกสูบจะได้รับการดึงและดันโดยตรงจากแขนต่อโยง ดังรูปที่ 10

ข้อดี มีโครงสร้างง่ายและปรับระดับได้ต่อเนื่อง

ข้อเสีย การส่งกำลังจากลูกสูบไปยังสลักลูกสูบถูกเหวี่ยงออกไปจากศูนย์กลาง ทำให้เกิดการเอียงตัวของลูกสูบขณะเคลื่อนที่

3.4 ก้านสูบ



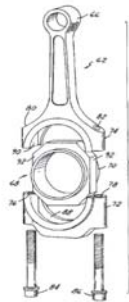
รูปที่ 11 การยกก้านสูบด้วยแรงดันน้ำมันเครื่อง

ที่มา: Patent No. US6,708,655B2

ก้านสูบ ประกอบด้วย ลูกสูบและกระบอกสูบ
 สวมกัน กำลังในการยกลูกสูบจะไดจากการดึงและ
 ดันของก้านสูบขณะที่เพลลาข้อเหวี่ยงหมุนและ
 ได้จากแรงดันน้ำมันเครื่องผ่านเพลลาข้อเหวี่ยง
 ดังรูปที่ 11

ข้อดี มีโครงสร้างง่าย

ข้อเสีย โครงสร้างไม่แข็งแรง ความไม่แม่นยำ
 ของตำแหน่งและปรับตำแหน่งได้ 2 ระดับ



รูปที่ 12 การยกก้านสูบด้วยแรงดันน้ำมันเครื่อง

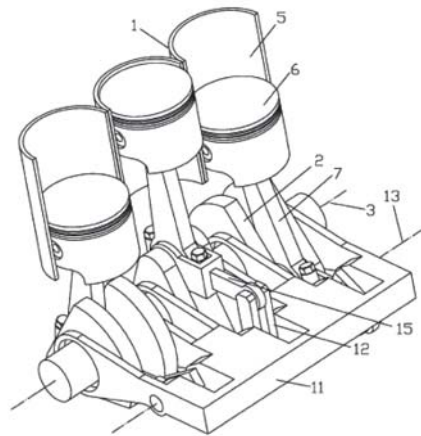
ที่มา: Patent No. US6,371,062B1

ก้านสูบจะสวมทับแบริ่งที่เคลื่อนที่ได้ภายใน
 ก้านสูบ กำลังในการยกลูกสูบจะไดจาก การดึง
 และดันของก้านสูบขณะที่เพลลาข้อเหวี่ยงหมุนและ
 ได้จากแรงดันน้ำมันเครื่องผ่านเพลลาข้อเหวี่ยง
 ดังรูปที่ 12

ข้อดี มีโครงสร้างง่าย

ข้อเสีย ความไม่แม่นยำของตำแหน่ง การ
 ปรับตำแหน่งได้ 2 ระดับและการใช้จุดหมุนซ้อนกัน
 จะทำให้เกิดเสียงดังและความคงทนลดลง

3.5 เพลลาข้อเหวี่ยง



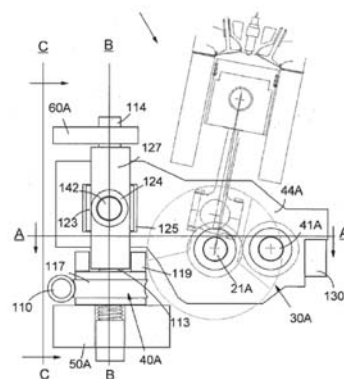
รูปที่ 13 การยกเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยลูกเบี้ยว

ที่มา: Patent No. US2011/0048383A1

จากรูปที่ 13 เพลลาข้อเหวี่ยงจะหมุนอยู่ใน
 แบริ่งที่มีลักษณะเอียงศูนย์ โดยแบริ่งนี้จะถูก
 ควบคุมโดยแขนต่อโยงจากภายนอกอีกทีหนึ่ง

ข้อดี โครงสร้างไม่ซับซ้อน ปรับระดับต่อเนื่อง
 ได้

ข้อเสีย การใช้จุดหมุนซ้อนกันจะทำให้เกิด
 เสียงดังและความคงทนลดลง ใช้พลังงานมากใน
 การเปลี่ยนระดับ เกิดปัญหาการต่อเพลลากับ
 ชุดเกียร์และการรั่วไหลของน้ำมันเครื่อง



รูปที่ 14 การยกเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยคาน

ที่มา: Patent No.US2006/0011156A1

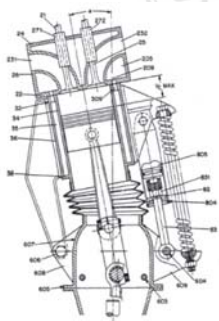
จากรูปที่ 14 เฟลาข้อเหวี่ยงจะหมุนอยู่ในคาน โดยคานนี้จะถูกควบคุมโดยแขนต่อโยงภายนอก อีกทีหนึ่ง

ข้อดี โครงสร้างไม่ซับซ้อน ปรับระดับต่อเนืองได้

ข้อเสีย ใช้พลังงานมากในการเปลี่ยนระดับ ความไม่มั่นคงในการหมุนของเฟลา การตอบสนองต่อการเปลี่ยนระดับช้า มีปัญหาการต่อเฟลากับชุดเกียร์และการรั่วไหลของน้ำมันเครื่อง

3.6 ฟาสูปและเสื่อสูบ

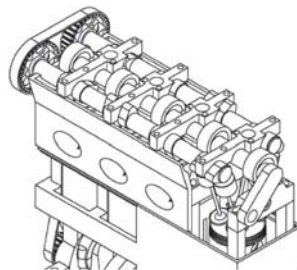
การเพิ่มและลดกำลังอัด ดังรูปที่ 15-17 ใช้วิธีเคลื่อนฟาสูปและเสื่อสูบไปพร้อม ๆ กัน การเคลื่อนที่ในลักษณะนี้ ชุดท่อไอดีและชุดท่อไอเสีย ซึ่งยึดติดกับฟาสูปจะขยับตามไปด้วย หมายความว่า ต้องใช้ปริมาตรภายในห้องเครื่องมากเพื่อการเคลื่อนไหว นอกจากนั้น ยังใช้พลังงานมาก มีปัญหาการต่อของท่อไอดีและท่อไอเสีย ความว่องไวในการปรับระดับและการรั่วไหลของน้ำมันเครื่อง แต่ยังคงมีข้อดี คือ ความสามารถในการปรับระดับแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 15 การเอียงตัวของฟาสูปและเสื่อสูบ

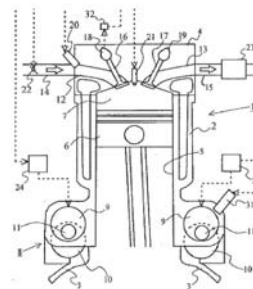
ที่มา: Patent No. US5,025,757

จากรูปที่ 15 ระบบนี้เป็นระบบที่มีชื่อเสียง และเป็นแรงบันดาลใจให้กับระบบใหม่ ๆ ที่ตามออกมา เนื่องจากมีการทดสอบอย่างจริงจังและเริ่มมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้



รูปที่ 16 การยกฟาสูปและเสื่อสูบจากด้านบน

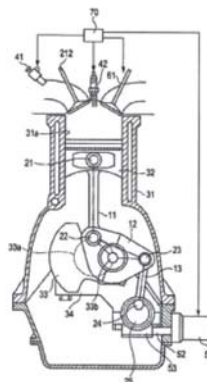
ที่มา: Patent No. US2010/0229834A1



รูปที่ 17 การยกฟาสูปและเสื่อสูบจากฐานล่าง

ที่มา: Patent No. US2006/0070605A1

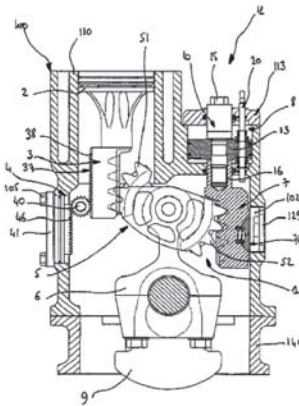
3.7 การยกกันสูบด้วยแขนต่อโยง



รูปที่ 18 การยกฟาสูปและเสื่อสูบ (แขนต่อโยง)

ที่มา: Patent No. US2007/0209630A1

การเพิ่มและลดกำลังอัดโดยใช้แขนต่อโยงนี้เป็นวิธีที่มีชื่อเสียงที่สุดต่อจากระบบในรูปที่ 15 เนื่องจากมีการสร้างและทดสอบเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ยังลบปัญหาที่สำคัญลงได้เกือบทั้งหมด เช่น การไม่เปลี่ยนแปลงเรขาคณิตของห้องเผาไหม้ ความไม่ซับซ้อนของโครงสร้าง การป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันเครื่อง ความแม่นยำและความว่องไวในการเพิ่มและลดกำลังอัด ความแข็งแรงทนทาน อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ยังคงเหลือข้อเสียอีกเพียงเล็กน้อย เช่น การสิ้นเปลือง ความเฉื่อยของมวลที่เพิ่มขึ้นและจุดศูนย์ถ่วงของเครื่องยนต์ที่ถูกยกให้สูงขึ้น ดังรูปที่ 18



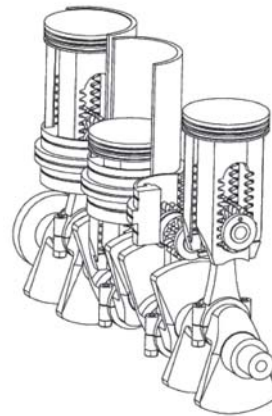
รูปที่ 19 การยกฝาสูบและเสื้อสูบ (ฟินเฟือง)

ที่มา: Patent No. US7,562,642B2

3.9 การยกลูกสูบด้วยฟินเฟือง

3.8 การยกกันสูบด้วยแขนต่อโยง (ฟินเฟือง)

การยกกันสูบเพื่อเพิ่มกำลังอัดวิธีนี้มีชื่อเสียงมากในปัจจุบันเช่นเดียวกับกับรูปที่ 15 เนื่องจากมีการทดสอบอย่างจริงจัง นอกจากนี้ มีการประชาสัมพันธ์ผ่านสื่อออนไลน์จำนวนมาก ด้วยอาจเป็นเพราะไม่ใช่ผู้ผลิตรถยนต์โดยตรง ระบบนี้แม้มีการทำงานตามวัตถุประสงค์แต่มีชิ้นส่วนจำนวนมาก โดยเฉพาะการใช้ฟินเฟืองขนาดใหญ่เป็นตัวส่งผ่านกำลัง ภายใต้ความร้อนจากการเผาไหม้ มักมีผลต่ออายุการใช้งาน การเกิดเสียงรบกวน และจากชุดลูกสูบควบคุมขนาดใหญ่ จึงทำให้ประเมินได้ว่าต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการยกลูกสูบและคงระดับให้ได้เมื่อเกิดการดันของลูกสูบในจังหวะกำลัง ดังรูปที่ 19



รูปที่ 20 การยกฝาสูบและเสื้อสูบ

ที่มา: Patent No. US2011/0048382A1

การยกลูกสูบด้วยวิธีหมุนฟินเฟืองดังรูปที่ 20 เป็นวิธีที่ซับซ้อนวิธีหนึ่ง เนื่องจากการใช้ฟินเฟืองจำนวนมากบริเวณห้องเผาไหม้ที่มีความร้อนสูง ซึ่งมักมีผลในด้านความคงทนและเสียงรบกวนตามมา นอกจากนี้ ลูกสูบยังมีรูปแบบที่สร้างได้ยาก และมีมวลมากซึ่งจะมีผลในด้านความเฉื่อยและการสะสมความร้อนอีกด้วย

4. สรุป

ผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตจำนวนมากมักมีข้อจำกัดมากมาย เช่น 1. ระบบต้องทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ 2. มีความเชื่อถือได้ 3. มีความแม่นยำ 4. มีชิ้นส่วนน้อย 5. มีการตอบสนองรวดเร็ว 6. มีการใช้พลังงานน้อย 7. มีความคงทน 8. ประกอบง่าย 9. บำรุงรักษาง่าย 10. ต้นทุนต่ำ 11. ไม่กระทบต่อชิ้นส่วนอื่น 12. ไม่กระทบกับสิ่งแวดล้อม ฯลฯ

จากข้อจำกัดที่จำเป็นข้างต้น พบว่า รูปแบบของกลไกแปรผันกำลังอัดต่อเนื่อง แบบใช้แขนต่อโยงภายนอก ดังรูปที่ 18 มีคุณสมบัติครบถ้วนมากที่สุด

อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตยังคงมีทางเลือกอื่น ๆ ที่มีอยู่แล้ว ปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและลงทุนน้อยกว่า เช่น การลดขนาดความจุของเครื่องยนต์และเพิ่มกำลังโดยใช้เครื่องอัดอากาศ (เทอร์โบชาร์จหรือซูเปอร์ชาร์จ) การลดการทำงานในบางสปีดแต่มีข้อเสีย คือ เครื่องยนต์เดินไม่เรียบและมีแรงบิดลดลงหรือแม้แต่การใช้เทคโนโลยีเพิ่มกำลังอัดให้มากที่สุด (แปรผันไม่ได้) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแม้ว่าจะเสี่ยงต่อการเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และการชิงจุดระเบิดก่อนก็ตาม

เมื่อเทคโนโลยีที่มีอยู่ถูกพัฒนาให้ถึงที่สุด ประกอบกับกฎหมายควบคุมการปล่อยมลพิษที่เข้มงวดมากขึ้นทุกปีและการพัฒนาระบบแปรผันกำลังอัดต่อเนื่องที่สมบูรณ์กว่าที่เป็นอยู่ เมื่อนั้นเราจะจะได้ใช้เทคโนโลยีนี้อย่างแน่นอน

5. เอกสารอ้างอิง

- MCE-5 VCRi. n.d. **Pushing Back The Fuel Consumption Reduction Limits**. [online]. Available from: www.vcr-i.com
- Yoshiaki Tanaka. 2007. **A Study of a Compression Ratio Control Mechanism for a Multiple-Link Variable Compression Ratio Engine**. SAE Paper No. 2007-01-3547.
- Mechanical Engineering. 2012. **“Miller Cycle | Sequential Valve Timing (S-VT) | Continuously Variable Transmission (CVT)”**. [online]. Available from: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/982-miller-cycle-sequential-valve-timing-s-vt-continuously-variable-transmission-cvt/>
- Ronald P. Maloney. n.d. **Variable Compression Ratio Device for Internal Combustion Engine**. Patent No. US6,708,655B2
- V. Durga Nageswar Rao. n.d. **Variable Compression Ratio Connecting Rods**. Patent No. US6,371,062B1.
- Manousos Pattakos. n.d. **Variable Compression Ratio Engine**. Patent No. US2011/0048383A1.
- Masami Sakita. n.d. **Engine with a Variable Compression Ratio**. Patent No. US2006/0011156A1.
- Daisuke Akihisa. n.d. **Internal Combustion Engine with Variable Compression Ratio**. Patent No. US2006/0070605A1.

- Keith E. Lawrence. n.d. **Combustion Engine Variable Compression Ratio Apparatus and Method.** Patent No. US2004/0159292A1.
- Vianney Rabhi. n.d. **Adjustment Device for a Variable Compression ratio Engine.** Patent No. US7,562,642B2.
- Koji Hiraya. n.d. **Variable Expansion-Ratio Engine.** Patent No. US2007/0209630A1.
- Makoto Hirano. n.d. **Internal Combustion Engine Variable Compression Ratio System.** Patent. No. US6,966,282B2.
- Viktor Pfeffa. n.d. **Arrangement for Controlling The Oil Feed to a Control Chamber of a Piston with Variable Compression Height.** Patent. No. 4,784,093.
- Alvin H. Berger. n.d. **Variable Compression Ratio Engine with Dedicated Bumper.** Patent No. US7,533,638B1.
- Dong Seok Lee. n.d. **Variable Compression Ratio Apparatus.** Patent No. US2012/0125297A1.
- John Edward Brevick. n.d. **Variable Compression Ratio.** Patent No. 5,755,192.
- Manousos Pattakos. n.d. **Back Gear Variable Compression Ratio Engines.** Patent No. 2011/0048382A1.
- Gregory J. Larsen. n.d. **Reciprocating Piston Engine with a Varying Compression Ratio.** Patent No. US5,025,757.
- Manousos Pattakos. n.d. **Variable Compression Ratio Engine.** Patent No. US2010/0229834A1.

