

PNÖMATİK SİSTEMLERDE KONUM GERİ BESLEMESİ YAPILARAK BASINÇ AYARLAMASI İLE HASSAS KONUM KONTROLÜ

Harun GEZİCİ¹, Doç. Dr. Birhan IŞIK²

ÖZET

Günümüz sanayinde hız ve maliyet avantajlarından dolayı geniş uygulama alanı bulunan pnömatik sistemlerde kullanılan havanın sıkışabilir olması pnömatik eyleyicilerin ilk ve son konumlarında kullanım mecburiyetini doğurmaktadır. Robot teknolojisindeki gelişmeler ışığında pnömatik eyleyicilerin diğer konumlarında durdurulmaları zorunlu haline gelmiştir. Bu sayede robotların maliyetleri ve hareket kabiliyetleri gelişme göstererek diğer teknoloji alanlarına da uygulanabilme imkânı doğacaktır. Özellikle biyomedikal alanındaki uygulamalarda son derece avantajlı olan pnömatik sistemler hastaların tedavisinde ve günlük ihtiyaçlarında her geçen gün kendisine daha fazla yer bulmaktadır. Yapay kas teknolojisindeki gelişmeler bu yönde devam etmektedir. Bu tez için oluşturulan deney setinde kontrol yöntemi olarak P (Proportional), PI (Proportional – Integral), PD (Proportional – Derivative) and PID (Proportional – Integral – Derivative) kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın yapılmasındaki amaç uygun PID kat sayılarının ayarlanması ile pnömatik silindirin hassas konum kontrolünü yapabilmektir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda pnömatik eyleyicinin kurs boyunun herhangi bir noktasında durdurulabildiği görülmüştür. Uygulanan kontrol yöntemlerinden en iyi sonucu sırasıyla PD, PID, P ve PI kontrol yöntemleri vermiştir. Asimetrik çift etkili silindirin ileri ve geri hareketlerindeki davranışlarının aynı olmadığı görülmüştür. Basınç artışının sistemin kontrolü üzerinde olumsuz etkiler yaptığı tespit edilmiştir. Hareket mesafeleri değiştiğinde sistemim aşma ve oturma zamanı davranışları da değiştiği gözlenmiştir. Bu noktalardaki eksikliklerin PID katsayılarının tekrar ayarlanmasıyla ortadan kalktığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: PID, Pnömatik konum kontrolü, hızlı anahtarlama yön kontrol valfi.

SENSITIVE POSITION CONTROL BY PRESSURE ADJUSTMENT IN PNEUMATIC SYSTEMS WITH POSITION FEEDBACK

ABSTRACT

Nowadays, pneumatic actuators which are operated by air pressure are widely used in industry because of their speed and cost advantage but also air pressure cause them work within some physical boundaries. Along with improvement in robotic technologies, pneumatic actuators must be operated beyond these boundaries. This way the cost of robots will reduce and also their movement capability will be improved for other application area. Especially, biomedical applications, which are used for patient's daily routines or physical treatment, need advanced pneumatic systems. Artificial muscle technology is being also developed within these improvements. In this thesis, a pneumatic control system has been operated with P (Proportional), PI (Proportional – Integral), PD (Proportional – Derivative) and PID (Proportional – Integral – Derivative) control techniques. Aim of this work is determining how PID parameters' changes effect on sensitive control of pneumatic cylinder. As a result of these experiments, it seems that pneumatic actuator can bestopped in any position along piston path. Best control techniques are resulted in order to PD, PID, P and PI. Forward and backward movements of asymmetric double-acting cylinder are different from each other. It has been observed that increase of air pressure has negative effect on controlling the system. Also different movement distance changes passing over and settling time behavior. In this point, tuning of the system has been adjusted by manipulating PID parameters.

Keywords: PID, Pneumatic position control, High-speed switching direction control valve.

Karabük Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı “PNÖMATİK SİSTEMLERDE KONUM GERİ BESLEMESİ YAPILARAK BASINÇ AYARLAMASI İLE HASSAS KONUM KONTROLÜ” adlı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

¹ Öğr. Gör. , Kırklareli Üniversitesi, harun.gezici@klu.edu.tr

² Doç. Dr. , Karabük Üniversitesi, birhanisik@karabuk.edu.tr

Giriş

Sanayi kuruluşlarının yüksek miktarlarda siparişlerini insan gücüyle değil otomasyonla hızlı ve güvenilir olarak yapmaya karar verdiklerinde pnömatik sistemler çok fazla tercih edilir olmuştur. Bu tercih edilirlilik elektro-pnömatik teknolojinin gelişmesiyle daha da artmıştır. Günümüzde otomatik kontrolün olduğu konveyör, el aletleri, belirli amaç için üretilmiş makineler, robotlar gibi birçok alanda pnömatik sistemler kullanılmaktadır (Aykaç 2011, Çetin 2004).

Pnömatik sistemlerin avantajlarının olmasının yanında havanın sıkıştırılabilir olmasından dolayı bir dezavantajı bulunmaktadır. Bu sıkıştırılabilirlik yük değişimlerinde emniyetli olmasıyla avantajlı olsa da hassas konumlandırma istenen yerlerde buna imkân vermemektedir. Konstrüksiyonları uyarınca bu eyleyiciler stroklarının başlarında ya da sonlarında konumlanmak zorundadır. Bunun nedeni havanın sıkışabilir olmasındandır. Orta konumda durdurmak için basınçlı hava girişine uygulanan hava kesilse de eyleyici içerisindeki iki bölmede hava basıncı eşitlenene kadar hareket ilgili tarafa doğru devam edecektir. Bu sayılan nedenlerden dolayı pnömatik eyleyiciler ilk ya da son konumlarında kullanılırlar ve ara konumlarda konumlandırma yapabilmek için çalışmalar devam etmektedir. Bu amaca ulaşıldığı takdirde pnömatik sistemler mekanik robotların yerini almaya başlayacak seri üretimde montaj, kaynak vb. işleri yapacaklardır. Bu hem robotların maliyetini hem ağırlığını hem de boyutlarını küçülteceği gibi serbestlik derecelerini arttıracaktır.

Pnömatik sistemlerde kullanılan eyleyicilerin kontrolleri yön kontrol valfleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu yön kontrol valfleri de kumanda şekillerine göre her hangi bir otomatik kontrol yöntemi seçilerek kontrol edilmektedir. Pnömatik sistemlerde hassas konum kontrolünün başarıyla ve düşük maliyetle yapılabilmesi için önemli olan uygun yön kontrol valfinin uygun kontrol yöntemiyle kontrol edilmesidir.

Pnömatik sistemlerde kullanılan değişik konfigürasyonlarda birden çok yön kontrol valfi çeşidi bulunmaktadır. Bu valflerden ilki servo valflerdir. Yüksek hassasiyetin istenildiği yerde kullanılmaktadır. Servo valflerin kumandasında kullanılan giriş sinyali ile valften alınan debi sinyali arasında tam bir lineerlik mevcuttur. Servo valfler daha çok hidrolik sistemlerde kullanılmakta olup düşük basınç değerlerinden (0,8 MPa) dolayı pnömatik sistemlerde yaygın olarak kullanılmadığı görülmektedir. İmalat işlemlerinin karmaşık olması nedeniyle maliyetleri yüksektir.

Bir diğer yön kontrol valfi kumanda şekli ise elektro-pnömatik kontroldür. Bu kontrol yöntemi pnömatik sistemlerde çok fazla kullanım alanına sahiptir ve kendi içerisinde kumanda şekli bakımından alt başlıklara ayrılır. Bunlar arasında en çok kullanılanı basit aç - kapa solenoid valflerdir. Bir diğer tipi ise oransal solenoid valf ve son olarak da son zamanlarda üzerinde fazlaca durulan hızlı anahtarlamalı valftir.

Basit bir yapıya ve kontrol şekline sahip olan aç - kapa tipi solenoid valfler kontrol şekillerine göre ikiye ayrılmaktadır. Düşük basınç değerlerinde doğrudan tetiklemeli olanları kullanılırken, yüksek basınç değerlerinde dolaylı kumandalı olanları kullanılır (Topçu ve Yüksel 2007). Basit yapılı aç - kapa solenoid valfler ile servo valfler arasında yer alan bir valf türü olan oransal valflerin debileriyle giriş gerilimi ya da akımı belirli bir bölgede lineerlik göstermektedir. İşte bu yüzden valfin adına oransal valf denmektedir.

Yukarıda sayılan yön kontrol valflerinin kontrol ve kumandasına dair yöntemlerin kimisi ucuz ancak hassas konumlandırma yapamamak da kimisi ise hassas konumlandırma yapsa da hem maliyeti yüksek olmakta hem de kumanda edilebilirliği zor olmaktadır. İşte bu nedenden dolayı hem maliyeti düşük hem hassas konumlandırma yapabilen hem de kumandası kolay olan bir yöntem geliştirmek üzere çalışmalar yoğunlaşmıştır. Kumanda şekillerine bakıldığında en kolayının bir elektriksel sinyal ile ki bu bir kare dalgadır valfin kumanda edilmesi en kolay yöntem olarak karşımıza çıkmıştır (Topçu ve ark. 2006). Bu nedenden dolayı hızlı anahtarlamalı yön kontrol valfinin kullanılması daha hassas konum kontrolü sağlanacaktır. Bu açıdan bakıldığında hızlı anahtarlamalı valfler üzerindeki çalışmalar günümüzde devam etmektedir (Topçu ve Yüksel 2007).

Pnömatik sistemin kontrolü için seçilecek kontrol yönteminin pnömatik sistemlerin lineer olmayan özelliklerini bertaraf ederek doğru sallaşmasını sağlayacak bir yöntem olması gerekmektedir. PID kontrol yöntemi bu iş için uygun olduğu düşünülmektedir. Bunun nedeni kolay bir kontrol algoritmaya sahip olması, değişkeninin az olması ve altında birçok kontrol yöntemini barındırmasıdır. Bir başka husus ise PID kontrol yönteminin diğer kontrol algoritmalarıyla uyumlu bir şekilde çalışmasıdır. Bu çalışmada PID kontrol yönteminin altında bulunan P (Proportional), PI (Proportional - Integral), PD (Proportional - Derivative) ve PID (Proportional - Integral - Derivative) kontrol yöntemleri karşılaştırılmalı olarak sınanacaktır. Bu kontrol yöntemleri kullanılarak valfin açık ve kapalı kalma süreleri DGM (darbe genişlik modülasyonu) tekniğiyle kontrol edilecektir (Gao ve Feng 2005, Chen ve Hwang 2005).

Bu bilgiler ışığında pnömatik sistemlerin otomatik kontrolünde kolay uygulanabilirliğine sahip ve başarılı sonuçların alınabileceği, bilinmeyen etkenlerin az olduğu ve diğer kontrol teorileriyle bütünleşerek çalışabilen PID kontrol yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Konumu kontrol edilecek pnömatik iş elemanı olarak uygulamalarda en çok kullanılan asimetrik çift etkili silindir seçilmelidir. Bu silindirin her iki basınç odasına giren havanın iki ayrı yön kontrol valfiyle kontrol edilmesi daha uygun olacaktır. Bu valflerin solenoid

tetiklemeli olması sürülmesini kolaylaştıracaktır. Yine bu yön kontrol valflerinin hızlı anahtarlama özelliği olması konumlama hassasiyeti ve sistem kararsızlığı üzerinde faydalı etkileri olacaktır. Valflerin sürülmesinde DGM (darbe genişlik modülasyonu) tekniğinin kullanılması kullanışlı bir yöntem olarak görünmektedir. Son olarak da pnömatik silindirin konumunu algılamak için lineer bir cetvel gerekmektedir.

Konuyla ilgili yapılan çalışmalardan birinde çift etkili pnömatik silindir, yüksek hızlı 3/2 yön kontrol valfi ve pozisyon ölçerden meydana gelen bir deney seti oluşturulmuştur (Taghizadeh ve ark. 2009). Deney setinde konum ve hız bilgileri filtrelenerek lineer yapılmış ve geri besleme yapılarak konumlama gerçekleştirmeye çalışılmıştır. Kontrol yöntemi olarak P ve PD kontrolleri uygulanmıştır. Silindirin sadece bir bölümüne giren ve çıkan havanın kontrolü yapılmıştır. Deneyde valfler DGM ile sürülmüştür. Yüksek hızlı yön kontrol valflerinin kullanılması ile servo sistemlerdeki gibi bir konumlama hassasiyetinin elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Başka bir çalışmada yüksek hızlı bir yön kontrol valfi tasarlamışlardır (Taghizadeh ve ark. 2009). Bu valfin matematiksel modeli çıkarılarak deneysel ve matematiksel modelden alınan sonuçlar kıyaslanmaya çalışılmıştır. Valfin sürülmesinde DGM kullanılmıştır. Kontrol yöntemi olarak da PI kontrol yordamı seçilmiştir. Matematiksel model Matlab Simulink te oluşturulmuştur. 4 bar basınç altında yapılan deneylerde matematiksel modelden alınan verilerle deney düzeneğinden alınan verilerin örtüştüğü gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada çift etkili bir silindirin kontrolünü bir adet yüksek hızlı 3/2 yön kontrol valfiyle yapmışlardır (Taghizadeh ve ark. 2009). Yön kontrol valfi DGM tekniği ile sürülmüştür. Sistemin kontrolünde PD kontrol yöntemi kullanılmıştır. Konum kontrolünde geri besleme olarak konum değil hız geri beslemesi yapılmıştır. Bozucu gürültülerden sinyali kurtarmak ve sistemi yarı lineer hale getirmek için karman filtresi kullanarak geri besleme sinyalleri algoritmaya katılmıştır. Deney seti ile birlikte bir model çıkarılmış değişik yükler altında sistemin konum kontrolü gerçekleştirilmiştir. Deneyler silindirin bir bölümüne giren havanın kontrolü yapılarak gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Sistemin yüklerin yarattığı bozucu etkileri bertaraf ettiği ve modele de uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada milsiz bir çift etkili silindir, servo oransal kontrollü 5/3 yön kontrol valfi, basınç kontrol valfi ve pozisyon ölçerden meydana gelen bir deney düzeneği oluşturmuşlardır (Takovoglu ve Laski 2011). Bu deney düzeneği üzerinde Fuzzy-PD kontrol yöntemini uygulamışlardır. Bu kontrol yöntemiyle pozisyon kontrolü ve elektro-pnömatik valfin öğrenmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneylerde sistemdeki yük artırılarak testler yapılmıştır. Bu yapılan testlerin sonucunda yük arttığında konumlanmanın daha hatalı sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada milsiz bir çift etkili silindir çift kollu çift etkili bir pnömatik silindir, 2 adet yüksek anahtarlama hızına sahip selenoid kontrollü 3/2 yön kontrol valfi, lineer potansiyometre ve kontrol elemanı olarak da PLC (Programmable Logic Controller) den oluşan bir deney seti oluşturmuşlardır (Cajetinac ve ark. 2012). Deney setinde çift kolu silindirin konum kontrolünü PID kontrol algoritmasının ürettiği DGM değerine göre kontrolü yapılmıştır. Çalışmanın amacı servo kontrol yönteminin maliyetlerini düşürerek uygulamanın yaygınlaştırılmasını sağlamaktır. Yapılan deneyler sonucunda sistemin set değerlerini takip ettiği doğruluk hassasiyetinin tatmin edici olduğu belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada yapay pnömatik bir kas sisteminin modellenmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır (Nuchkrua ve Leephakpreeda 2013). Yaptıkları çalışmada yapay pnömatik kas hidrojen tahriklidir ve kontrolü de Fuzzy – PID hibrit kontrol yöntemiyle yapılmıştır. Hidrojen elementinin miktarı ısıtıcı ve soğutucu termodinamik modül tarafından sağlanmıştır. Bu kontrol yönteminde Fuzzy algoritması PID kazançlarını hesaplarken PID kontrol kısmı sistemin dış etkilerden koruma görevi görmüştür. Yapılan model üzerinde Fuzzy – PID hibrit kontrol yöntemiyle geleneksel PID kontrol yöntemi bazı parametreler açısından kıyaslanarak sonuçlar çıkarılmaya çalışılmıştır. Testler sonucunda Fuzzy – PID melez kontrol yöntemi uygulanarak alınan veriler aşma miktarı, oturma zamanı, yükselme zamanı ve kalıcı hal hatası gibi parametrelerde klasik PID kontrolden daha iyi oldu sonucuna varılmıştır.

Başka bir çalışmada bir adet çift etkili silindir, 4 adet yüksek anahtarlama kabiliyetine sahip 2/2 yön kontrol valfi, 2 adet basınç sensörü ve pozisyon ölçerden oluşan bir deney seti oluşturmuşlardır (Najjari ve ark. 2014). Sistemin kontrolünde Fuzzy – PID melez kontrol yöntemi kullanılmıştır. Yön kontrol valflerinin sürülmesinde DGM kullanılmıştır. Deney setinde kullanılan yön kontrol valflerinin ömürlerinin uzaması için DGM hassasiyeti üzerinde durulmuş ve ayrıca deney setinde DA – DA dönüştürücü kullanılarak yön kontrol valflerinin ömrünün uzatılması amaçlanmıştır. Ayrıca PI kontrol yöntemi Fuzzy kontrolle desteklenerek konumlama hassasiyet arttırılmaya çalışılmıştır. Yapılan testler sonucunda olumlu sonuçların alındığı sonucuna varılmıştır.

Sistemin Tasarımı ve Kontrolü

Elektronik Sistem

Sistemin kontrolünü gerçekleştirmek için kontrol amacına uygun bir elektronik kart tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kartın üzerine kontrol işleminin merkezi olan mikro denetleyici yerleştirilmiştir. Mikro denetleyici PIC 18F4550 olarak belirlenmiştir. Bu kontrolör CCS-C diliyle programlanmıştır. Kullanıcıların gerekli bilgileri görmeleri ve girmeleri için 20x4 LCD ekran kullanılmıştır. Gerekli parametrelerin kullanıcılar tarafından değiştirilebilmesi için 4 adet buton kontrol panelinin üzerine yerleştirilmiştir ayrıca deney setinin enerjisini açıp kapayan bir anahtar da panelin üzerinde bulunmaktadır. Deney setinde kullanılan ekipmanlara enerji sağlamak için 5A lik DA güç kaynağı kullanılmıştır. Deney setindeki pnömatik silindirin konumunu algılayacak olan lineer potansiyometrenin bağlantılarında yine elektronik kart üzerine yapılmıştır. Bu potansiyometre 0 – 150 mm arasında ölçüm yapabilen ve buna karşılık olarak 4 – 20 mA, 0 – 5 V gerilim üretebilme özelliğine sahiptir. Potansiyometre konumuna göre akım veya gerilim değerlerini lineer bir şekilde artırmakta veya azaltmaktadır. Potansiyometre pnömatik silindire bir bağlantı elemanı ile mekanik olarak bağlanmıştır.

Mekanik Sistem

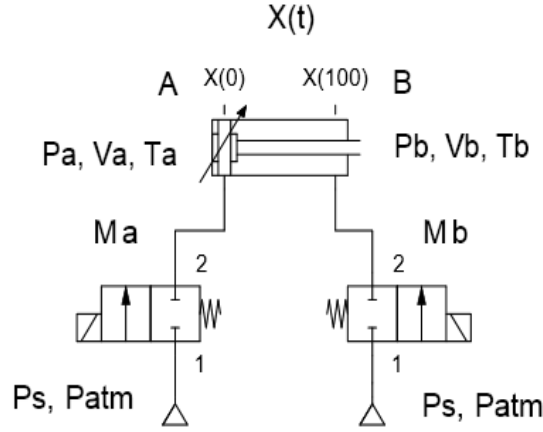
Deney düzeneğindeki pnömatik sisteme basınçlı hava bir kompresör tarafından sağlanmaktadır. Pnömatik sistemlerde kullanılan havanın belirli basınç ve bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu nedenden dolayı deney setinin basınçlı hava girişinde 0-10 bar arasında çalışabilen manuel olarak basınç değerinin ayarlanabildiği ve bir basınç göstergesinin bulunduğu şartlandırıcı kullanılmıştır. Pnömatik silindirin ileri veya geri hareketini sağlamak için 5/2 selenoid tetiklemeli yön kontrol valfi kullanılmıştır. Kullanılan 5/2 yön kontrol valfi 5° ile 50°C çalışma sıcaklığına, 1,5 – 8 bar çalışma basıncına sahiptir ve saniyede 5 kez emniyetli olarak tetiklenebilmektedir. Ayrıca 50 ms cevap süresi bulunan bu valf 24V DA ile beslenmektedir. Pnömatik silindirin ön ve arka bölmelerindeki giren ve çıkan havanın kontrolünü sağlamak için yüksek anahtarlama hızına sahip selenoid tetiklemeli yay geri getirmeli 2/2 yön kontrol valfi kullanılmıştır. Kullanılan 2/2 yön kontrol valfi 5° ile 60°C çalışma sıcaklığına, 0,9 – 8 bar çalışma basıncına sahiptir ve saniyede 125 kez emniyetli olarak tetiklenebilmektedir. Ayrıca 7,5 ms cevap süresi bulunan bu valf 24V DA ile beslenmektedir. Kontrol edilecek olan pnömatik silindir ise Ø32x100 mm boyutlarında çift etkili asimetrik bir silindiridir. Deney setinin genel görünümü Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Deney Seti

Pnömatik Sistemin Matematiksel Modeli

Havanın sıkıştırılabilir olmasından dolayı pnömatik sistemler lineer olmayan yapıdadırlar ve kesin bir matematiksel model çıkarmak zordur. PID kontrol yordamını kullanarak bu lineer olmayan sistemin tanımlanamayan etkileri bertaraf edilmeye çalışılmaktadır. Bundan önce yapılan çalışmalarda kullanılan ve genel kabul gören bir matematiksel model sistemin davranışı hakkında bir fikir vermesi adına burada paylaşılacaktır. Matematiksel modele konu olan pnömatik devre şekil 2' deki gibidir [44].



Şekil 2. Pnömatik sistem görünümü

Bu diyagramda yola çıkarak silindirin her iki tarafına uygulanan kütleli debi aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Bu aynı zamanda valflerin matematiksel modelidir (Topçu ve Yüksel 2005).

$$M_a = \frac{C_{q_a} \cdot C_{m_a} \cdot A_a \cdot P_s}{\sqrt{T_a}}$$

$$C_{m_a} = f \frac{P_a}{P_s}$$

$$M_b = \frac{-C_{q_b} \cdot C_{m_b} \cdot A_b \cdot P_b}{\sqrt{T_b}}$$

$$C_{m_b} = f \frac{P_{atm}}{P_b}$$

Burada P_a ve P_b silindirin A ve B bölgelerindeki basıncı göstermektedir. P_s besleme basıncını P_{atm} ise atmosfer basıncını simgelemektedir. T_a ve T_b her iki bölgedeki sıcaklıkları göstermektedir. A_a ve A_b silindir pistonunun ilgili bölgelerdeki alanlarını göstermektedir. C_m kütleli akış parametresini ve C_q ise boşaltım kat sayısını göstermektedir (Topçu ve Yüksel 2005).

Havanın sıkıştırma birliği hesaba katılarak yapılan bu modellemede silindirin her iki tarafına da giren (M_a) ve çıkan (M_b) havanın kütleli debi ifadeleri verilmiştir (Topçu ve Yüksel 2005).

$$M_a = \frac{1}{RT_a} \left\{ P_a \frac{dV_a}{dt} + \frac{V_a}{\lambda} \frac{dP_a}{dt} \right\}$$

$$-M_b = \frac{1}{RT_b} \left\{ P_b \frac{dV_b}{dt} + \frac{V_b}{\lambda} \frac{dP_b}{dt} \right\}$$

Burada λ özgül ısı oranını, R gaz sabitini, V_a ve V_b ilgili silindir bölgelerinin hacimlerini ifade etmektedir. Deney setinde yük ile bir test yapılamayacağından dolayı yük modelinin verilmesine gerek yoktur. Burada boru hacimleri v_b gibi şeylerin ihmal edildiği görülmektedir (Topçu ve Yüksel 2005).

Deney Setindeki Basınç Kayıpları

Pnömatik sistemlerde kullanılan elemanlar kompresörden gelen basınçlı havaya karşı bir direnç oluşturmaktadır. Bu nedenden dolayı sistem üzerinde kullanılan ekipmanlar kompresörden gelen havanın basıncını iş elemanına gidene kadar bir miktar düşürmektedir. Basınç kayıpları özellikle basınçlı havanın iletiği hortumlarda meydana gelmektedir. Hortumlarda meydana gelen basınç kaybını aşağıda verilen formül ile hesaplanabilir (Emil 2001).

$$\Delta p = \frac{I \times \theta^{1,85} \times 450}{d^5 \times p}$$

Bu formülde Δp hortumda meydana gelen basınç kaybını bar cinsinden gösterirken, I hortumun boyunu metre cinsinden göstermekte, θ basınçlı havanın debisini litre / saniye cinsinden göstermekte, d hortumun iç çapını milimetre cinsinden göstermekte ve p 'de çalışma basıncını bar cinsinden göstermektedir. Deney setinde kullanılan hortumun uzunluğu $I = 0,7 m$, kullanılan hortumun iç çapı $d = 4 mm$, çalışma basıncı $p = 6 bar$ ve son olarak basınçlı havanın debisi $\theta = 4,5 l/s$ 'dir (Karacan 2000). Bu verilerin formülde yerine yazılması sonuç denklem 3.8 ortaya çıkmaktadır.

$$\Delta p = \frac{0,7 \times 4,5^{1,85} \times 450}{4^5 \times 6}$$

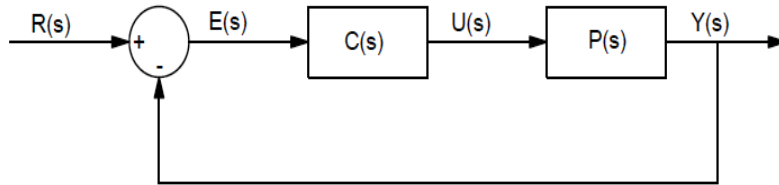
$$\Delta p = 0,828 \text{ bar}$$

PID Kontrolör

Kontrol algoritmasına ihtiyaç duyulan bilimsel veya endüstriyel alanlarda en çok kullanılan kontrol yöntemleri arasında PID gösterilebilir. Basit bir algoritmaya sahip olması uygulama açısından düşük maliyetli olmaktadır [46]. Bu kontrol yönteminin isminde bulunan harflerden P oransal kazanç simgelerken, I integral kazanç simgelemekte ve D türevsel kazanç anlamında kullanılmaktadır. Kontrol edilecek olan sistemin özellikleri göz önüne alınarak farklı kontrol yöntemleri uygulanabilir. Bunlar P, PI, PD, PID olarak dört guruba ayrılabilir. Bu kontrol yöntemlerinden en iyi sonucun PID kontrolün vermesi beklenir [47,7]. Ancak bazı durumlarda diğer P, PI, PD kontrollerde iyi sonuçlar verebilir. Bu gibi durumlarda en basit yordamın seçilmesi gerekmektedir (Bingül 2005).

PID Kontrolörün Yapısı

PID kontrol sisteminin yapısı genel olarak Şekil 3 gösterildiği gibidir. Burada $R(s)$ ile gösterilen kontrol edilecek olan sisteme uygulanan sinyaldir. $E(s)$ ile gösterilen ise sistemin giriş referans değeri $R(s)$ ile kontrol edilen sistemin cevabı olan $Y(s)$ arasındaki farktır. PID denetleyicisi ise $C(s)$ ile ifade edilmiştir. PID denetleyicisinin çıkışındaki sinyal ise $U(s)$ olarak gösterilmektedir. $P(s)$ Kontrol edilecek sistemi ve $Y(s)$ de sistemin cevabını göstermektedir [46].



Şekil 3. PID kontrol sisteminin genel yapısı.

PID denetleyicisinin transfer fonksiyonu ise aşağıda verildiği gibidir (Akkaya ve ark. 2005).

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)}$$

PID kontrolörün s domeninde oransal kazanç, integral kazanç ve türevsel kazanç olarak ifadesi de denklem şu şekilde olur.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Bu ifade biraz düzenlenecek olursa

$$C(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

Nihai denkleme ulaşılmış olur (Bingül 2005).

Burada K_p oransal kazancı, K_d türevsel kazancı ve K_i integral kazancı göstermektedir. Burada $E(s)$ ile ifade edilen referans değeri $R(s)$ ile sistemin çıkış değeri $Y(s)$ arasındaki hata PID fonksiyonuna gönderilerek $U(s)$ nin hesaplanması sağlanır. Bu sinyal ise aşağıda verilen denklemdeki gibidir (Bingül 2005).

$$u(t) = K_p \cdot e + K_d \cdot \frac{de}{dt} + K_i \int e \cdot dt$$

Deneyin Yapılışı

Deney setinde yapılan testler Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine atölyesinde gerçekleştirilmiştir. Deney seti için gerekli olan basınçlı hava şebeke gerilimi ile beslenen 0 – 20 bar arası basınç üretebilen seyyar tip yekpare kompresör tarafından üretilmektedir. Deney setinin basıncını ayarlamak için pnömatik hattın girişinde bulunan 0–10 bar arası çalışma aralığına sahip şartlandırıcıdan yararlanılmaktadır. Deneylerimizde literatür araştırmasından ve ön deneylerden elde edilen bilgi ışığında 6 bar çalışma basıncı seçilmiştir. Havanın iletiminde 6 mm çapında plastik malzemeden yapılmış hortumlar ile yapılmıştır. Deney setinde 100 mm çalışma uzunluğuna sahip çift etkili asimetric pnömatik silindir kullanılmaktadır ve bu pnömatik silindirin konum kontrolü yapılmıştır. Pnömatik silindirin konum bilgisi 0 – 150 mm arasında ölçüm yapabilen ve 4 – 20 mA analog çıkış veren, $\pm\% 0,05$ lineerliğe sahip lineer potansiyometre kullanılmıştır. Potansiyometrenin 0 V çıkışı 0 mm kabul edilmiş 5 V çıkışı ise 150 mm olarak kabul edilmiştir. Bu iki değer arası 10 bit lik bir çözünürlüğe ayrılmış ve işlemlerde 0 ile 1023 arasında bir sayı karşılığı ile kullanılmıştır. Pnömatik silindirin konum kontrolü 5/2 selenoid tetiklemeli yön kontrol valfi ile yapılmaktadır. Bu valfin konum değiştirmesi için bobinine 24V DC uygulanması gerekmektedir bu gerilim değeri de kontrol kartı tarafından üretilmektedir. Valf tetiklendiğinde hangi konum geldiyse tetik kesilse de o konumda kalacak şekilde çalışmaktadır. 5/2 yön kontrol valfi 1,5 bar ile 8 bar arasındaki çalışma basınçlarında çalışması teknik özelliklerinde belirtilmiştir. Bu valfin 5°C ile 50°C arasında çalışma sıcaklığı bulunmaktadır. Bu sayılan koşullarda valf çalıştırılırsa 50 ms cevap süresi vardır. Silindirin ayrıca her iki bölgesindeki basınçlı havayı kontrol etmek için 2/2 yüksek anahtarlama hızına sahip selenoid tetiklemeli yay geri getirmeli normalde kapalı yön kontrol valfi kullanılmıştır. Bu yön kontrol valfi 24V DC gerilim ile çalışmaktadır bobinine bu gerilim uygulandığında valf konum değiştirerek açık konuma gelecektir. Tekrar kapalı konuma dönülmesi isteniyorsa enerjisi kesilmelidir. 0,9 ile 8 bar arasında çalışma basıncına sahip olan bu valfin çalışma sıcaklığı -5°C ile 60°C arasındadır. Bu değerler uygulandığında valf 2,5 ms de açılıp 5 ms de kapanmaktadır. Deney setinde yapılan testlerde 4 farklı kontrol yöntemi uygulanmıştır bunlar P, PI, PD ve PID'dir. Her kontrol yöntemi uygulanırken ilgili kontrolörün kazanç değeri (K_p , K_i , K_d) kontrol paneli üzerinden girilebilecek şekilde deney seti dizayn edilmiştir. Bu kazanç değerleri 0,0 ile 0,9 arasında istenilen bir değere göre ayarlanabilir. Bu ayarlama deneme yanılma yöntemiyle yapılmıştır. Kazanç değerlerini değiştirmek sistem davranışında bir etki yapmıyorsa kontrol programının kendisine müdahale edilmeli ve kat sayılar değiştirilmelidir. Bu kazanç değerlerinin ayarlanması silindirin istenilen konuma aşma yapmadan salınımı az olarak oturmasına göre belirlenir. Unutulmaması gereken her bir kazanç değeri bir diğerinin sistem üzerindeki davranışlarını iyileştirebileceği gibi kötüleştirebileceğidir. Deneyler yapılırken silindir 0 konumundan son konumu olan 100 mm doğru hareket ettirilerek aşma miktarı ve sürekli rejim hatası bakımından incelemeler yapılmıştır. Silindir asimetric olduğundan 100 mm den 0 mm doğru aynı şekilde hareket ettirilerek sistem davranışları yine aşma miktarı ve sürekli rejim hatası bakımından incelenmiştir.

Tablo 1. Deney parametreleri ve sonuçları

Deney No	Kontrol Yöntemi	Çalışma Basıncı [Bar]	Kp	Ki	Kd	Hareket [mm]	Aşma [±mm]	Sürekli Rejim Hatası [±mm]	Sonuç
1	P	6	0,2	0,0	0,0	0-10	0	0,6	%6
2	P	6	0,2	0,0	0,0	0-50	0	0,9	%1,8
3	P	6	0,2	0,0	0,0	0-90	0	1	%1,11
4	P	6	0,2	0,0	0,0	100-10	0	0,7	%7
5	P	6	0,2	0,0	0,0	100-50	+1,4	0,8	%1,2
6	P	6	0,2	0,0	0,0	100-90	+5,5	0,7	%0,78
7	PI	6	0,1	0,5	0,0	0-10	0	1,2	%12
8	PI	6	0,1	0,5	0,0	0-50	+2,5	0,7	%1,4
9	PI	6	0,1	0,5	0,0	0-90	+1,5	0,5	%0,55
10	PI	6	0,1	0,5	0,0	100-10	0	0,7	%7
11	PI	6	0,1	0,5	0,0	100-50	+2	0,9	%1,8
12	PI	6	0,1	0,5	0,0	100-90	+1,6	0,9	%1
13	PD	6	0,1	0,0	0,4	0-10	0	1	%10
14	PD	6	0,1	0,0	0,4	0-50	0	0,8	%1,6
15	PD	6	0,1	0,0	0,4	0-90	0	0,7	%0,78
16	PD	6	0,1	0,0	0,4	100-10	0	0,6	%6
17	PD	6	0,1	0,0	0,4	100-50	0	0,8	%1,6
18	PD	6	0,1	0,0	0,4	100-90	0	0,6	%0,67
19	PID	6	0,1	0,4	0,9	0-10	0	1,3	%13
20	PID	6	0,1	0,4	0,9	0-50	0	1,2	%2,4
21	PID	6	0,1	0,4	0,9	0-90	0	0,8	%0,89
22	PID	6	0,1	0,4	0,9	100-10	0	1	%10
23	PID	6	0,1	0,4	0,9	100-50	0	0,5	%1
24	PID	6	0,1	0,4	0,9	100-90	0	0,7	%0,78

Sonuçlar

Genel olarak değerlendirildiğinde tüm kontrol yöntemleri kabul edilebilir bir davranış sergilemiştir. Buna karşın iyiden kötüye doğru bir sıralama yapılması gerekirse sıralama PD, PID, P ve PI kontrol yöntemleri olarak oluşmaktadır. Deney seti üzerinde türevsel kazanç değerinin etkisinin ciddi bir şekilde hissedildiği ve karakteristik davranışı olan aşmayı yok etme becerisi görülmüştür. İntegral kazanç değeri deney setini davranışlarını bozucu yönde etki yapmıştır. Bunun nedeni de oransal kat sayıya benzer karakteristikte olmasında dolayı PID hesabını pozitif yönde etkileyerek sonucu arttıran yönde etki göstermesidir. Pnömatik silindirin konumlama hatasının pozitif yönde olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak piston yüzey alanlarının eşit olmamasıdır. Pnömatik silindirin referans noktasına ulaşma zamanının mesafe uzadıkça arttığı görülmektedir. Bu, yolun uzamasının doğal bir sonucudur ancak pnömatik silindirin sönümlü sinüzoidal bir aşma davranışı göstermeden referansa oturması da bu doğru orantının oluşmasının bir nedeni olduğu sonucuna varılmıştır. Pnömatik silindirin ileri ve geri hareket karakteristikleri aynı değildir bunun birinci nedeni piston yüzey alanlarının eşit olmaması iken diğer nedeni kazanç değerlerinin ileri yönlü harekette ayarlanmasıdır. P kontrol yönteminin kullanıldığı deneylerin ileri yönlü hareketlerinde %6 - %1,11 arasında bir hata ile referansa otururken geri yönlü hareketlerinde %7 - %0,78 arasında hatayla referansa oturmaktadır. PI kontrol yönteminin

kullanıldığı deneylerin ileri yönlü hareketlerinde %12 - %0,55 arasında bir hata ile referansa otururken geri yönlü hareketlerinde %7 - %1 arasında hatayla referansa oturmaktadır. PD kontrol yönteminin kullanıldığı deneylerin ileri yönlü hareketlerinde %10 - %0,78 arasında bir hata ile referansa otururken geri yönlü hareketlerinde %6 - %0,67 arasında hatayla referansa oturmaktadır. PID kontrol yönteminin kullanıldığı deneylerin ileri yönlü hareketlerinde %13 - %0,89 arasında bir hata ile referansa otururken geri yönlü hareketlerinde %10 - %0,78 arasında hatayla referansa oturmaktadır.

Öneriler

Bu tarz kontrol uygulamaları yapılırken silindirin daha hassas kontrolünü yapmak adına temassız ölçüm yapabilen bir mesafe ölçüm sensörü kullanılması daha uygun olacaktır. Bunun nedeni mekanik birleştirme sonucu silindirin konumunu ölçen sensörler silindirin sürtünme katsayısını artırmakta ve hareket kabiliyetini azaltmaktadır. Yine mekanik bağlantıda esneme olabileceğinden silindirin her hareketi algılanmaya bilmektedir.

Konumlama hassasiyeti üzerinde kontrol yöntemlerinin kazanç değerlerinin önemli etkileri vardır. Bu değerlere göre sistem DGM üretmekte ve sistemin aşma ve sinüzoidal davranışlarını bu değerler belirlemektedir. Bunun yanında bu değerler referans noktasına ulaşma zamanını da etkilemektedir. Bu nedenden dolayı sistem her mesafe değeri için ayrı bir kazanç değerine ihtiyaç duymaktadır. PID kontrol yöntemine destek olarak Fuzzy lojik kontrol yönteminin işin içerisine dâhil edilerek melez bir kontrol yöntemi oluşturulmalı ve her durum için ayrı bir kazanç katsayı değeri oluşturulmalıdır.

Yapılan deneylerde silindirin ileri ve geri hareketlerinde birbirlerinden farklı karakteristiklerinin olduğu görülmektedir. Bu kontrol edilecek olan sistem için bir dezavantaj oluşturacak bir durumdur. Bu davranış bozukluğunun sebebi silindirin tek kollu olmasından dolayı piston yüzey alanlarının birbirleriyle eşit olmamasıdır. Bu nedenden dolayı silindirin tek kollu değil çift kollu olarak kullanılması gerekmektedir. Başka bir çözüm yolu da yukarıda bahsedildiği gibi fuzzy lojik kontrol yöntemi sisteme adapte ederek melez bir kontrol yöntemi oluşturulmalıdır. Bunun sonucunda da her mesafeye ayrı kazanç değeri hesaplanacağı gibi her yöne de farklı kazanç değeri hesaplanacaktır.

Kaynakça

- Akkaya, A. V., Sevilgen, S. H., Erdem, H. H. ve Çetin, B. , (2005). Simulink kullanarak bir pnömatik sistemin simülasyonu. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 6 (2): 155-162.
- Anh, H. P. H. ve Ahn, K. K. , (2001). Hybrid control of a pneumatic artificial muscle (PAM) robot arm using an inverse NARX fuzzy model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24 , : 697–716.
- Aykaç, E. S. , (2011). *Pnömatik-hidrolik*. Ankara: TMMOB Ankara Şubesi.
- Bingül, Z. , (2005). *Matlab ve Simulinkle Modelleme ve Kontrol 1*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Cajetinac, S., Seslija, D., Aleksandrov, S. ve Todorovic, M. , (2012). PWM control and identification of frequency characteristics of a pneumatic actuator using PLC controller. *Electronics and Electrical Engineering*, 7 (123): 21–26.
- Chen, C. K. ve Hwang, J. , (2005). Iterative learning control for position tracking of a pneumatic actuated X–Y table. *Control Engineering Practice*, 13: 1455-1461.
- Çetin, R. , (2004). *İleri Kumanda Teknikleri 2 Pnömatik Elektro Pnömatik*. Ankara: Doğuşum Matbaacılık.
- Emil, M. , (2001). Hava dağıtım sistemleri. II. *Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisine Sunulmuş Bildiri*.
- Gao, X. ve Feng, Z. J. , (2005). Design study of an adaptive fuzzy-PD controller for pneumatic servo system. *Control Engineering Practice*, 13: 55-65.
- Karacan, İ. , (2000). *Hidrolik ve Pnömatik*. Kütahya: Birsen Yayın Evi.
- Najjari, B., Barakati, S. M., Mohammadi, A., Futohi, M. J. ve Bostanian, M. , (2014). Position control of an electro – pneumatic system based on PWM technique and FLC. *ISA Transactions*, 53: 647–657.
- Nuchkrua, T. ve Leephakpreeda, T. , (2013). Fuzzy self-tuning PID control of hydrogen-driven pneumatic artificial muscle actuator. *Journal of Bionic Engineering*, 10 : 329–340.
- Taghizadeh, M. , Ghaffari, A. ve Najafi, F. , (2009). Improving dynamic performances of PWM-driven servo-pneumatic systems via a novel pneumatic circuit. *ISA Transactions*, 48: 512-518.
- Taghizadeh, M., Ghaffari, A. ve Najafi, F. , (2009). Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications. *C. R. Mecanique*, 337: 131–140.
- Taghizadeh, M. , Najafi, F. ve Ghaffari, A. , (2010). Multimodel PD-control of a pneumatic actuator under variable loads. *Int J Adv Manuf Technol*, 48: 655–662.

- Topçu, E. E. ve Yüksel, İ. , (2007). Elektro-pnömatik ve alternatif valflerin gelişimi ve karakteristiklerinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12 (2): 21 – 33.
- Topçu, E. E. ve Yüksel, İ. , (2007). DGM denetimli hızlı anahtarlama valfi ile pnömatik bir sistemin konum denetiminin deneysel araştırılması. *Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 19 (2): 193-200.
- Topçu, E. E. ve Yüksel, İ. , (2005). Elektro-pnömatik bir sistemde konum denetiminin araştırılması. *III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisine Sunulmuş Bildiri*.
- Topçu, E. E. , Yüksel, İ. ve Kamış, Z. , (2006). Development of electro – pneumatic fast switching valve and investigation of its characteristics. *Mechatronics*, 16: 365-378.

NOT: Bu makalenin üretilmiş olduğu tezi proje olarak destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projelerini destekleme birimine teşekkür ederiz.