

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Landasan Teori**

##### **2.1.1 Kontraksi otot**

Kontraksi otot adalah proses kompleks yang memungkinkan tubuh manusia melakukan berbagai gerakan dan aktivitas fisik. Ini melibatkan koordinasi yang presisi antara saraf dan jaringan otot. (Billones *et al.*, 2021)

Motoneuron adalah saraf yang bertanggung jawab untuk menginervasi serat otot. Ketika motoneuron dan serat otot bekerja bersama, mereka membentuk unit motorik. Jumlah serat otot dalam satu unit motorik bervariasi tergantung pada fungsi otot tersebut. Misalnya, unit motorik yang mengontrol ekspresi wajah memiliki sedikit serat otot dibandingkan dengan unit motorik yang bertanggung jawab atas aktivitas fisik seperti berolahraga. (Gash *et al.*, 2023)

Kontraksi otot rangka awalnya dimulai pada sambungan neuromuskuler, yang merupakan sinapsis antara motoneuron dan serat otot. Propagasi potensial aksi di motoneuron dan depolarisasi selanjutnya menyebabkan pembukaan saluran kalsium bergerbang voltase ( $\text{Ca}^{2+}$ ) di membran presinaptik. Influx  $\text{Ca}^{2+}$  menyebabkan pelepasan asetilkolin (ACh) pada taut neuromuskular, yang berdifusi ke dalam membran pascasinaps serabut otot. Membran pascasinaps serat otot juga dikenal sebagai pelat ujung motorik. ACh berikatan

dengan reseptor nikotinic yang terletak di motor endplate dan mendepolarisasi mereka, memulai potensial aksi di serat otot. (Gash *et al.*, 2023)

Kopling eksitasi-kontraksi mengacu pada mekanisme yang mengubah potensial aksi serat otot yang disebutkan di atas menjadi kontraksi serat otot. Potensi aksi dari membran sel otot yang mengelilingi myofibril berjalan ke tubulus T, yang bertanggung jawab untuk mentransmisikan potensial aksi dari permukaan serat otot ke bagian dalam. T-tubulus mengandung reseptor dihidropiridin yang berdekatan dengan butiran terminal retikulum sarkoplasma dari serat otot. Ketika tubulus T didepolarisasi, reseptor dihidropiridinya mengalami perubahan konformasi yang secara mekanis berinteraksi dengan reseptor ryanodine di retikulum sarkoplasma. Interaksi ini membuka reseptor ryanodine, menghasilkan pelepasan  $\text{Ca}^{2+}$  dari retikulum sarkoplasma. Hasil peningkatan  $\text{Ca}^{2+}$  intraseluler berikatan dengan kompleks troponin-C-troponin filamen tipis. Interaksi antara  $\text{Ca}^{2+}$  dan troponin C menunjukkan kooperativitas, yang berarti bahwa setiap  $\text{Ca}^{2+}$  yang mengikat troponin C meningkatkan afinitas pengikatan troponin C untuk molekul  $\text{Ca}^{2+}$  berikutnya, hingga total empat ion  $\text{Ca}^{2+}$  per troponin C. Akibatnya pengikatan  $\text{Ca}^{2+}$ , kompleks troponin mengalami perubahan konformasi yang menyebabkan perpindahan tropomiosin dari tempat pengikatan

miosin pada F-aktin, yang memungkinkan miosin filamen tebal berikatan. (Ronca & Raggi, 2023)

Siklus lintas-jembatan, suatu peristiwa yang terjadi selama Kopleng eksitasi-kontraksi, mengacu pada mekanisme dimana filamen tebal dan tipis meluncur melewati satu sama lain untuk menghasilkan kontraksi otot. Pada awal siklus, Ketika miosin terikat erat dengan aktin, tidak ada adenosin trifosfat (ATP) yang terikat pada myosin, suatu keadaan yang dikenal sebagai rigor; ini adalah keadaan sementara pada otot yang berkontraksi, sedangkan tanpa adanya ATP, seperti pada kematian, keadaan ini bersifat permanen dan disebut rigor mortis. Selanjutnya, ATP berikatan dengan kepala miosin, menginduksi perubahan konformasi pada miosin yang menurunkan afinitasnya terhadap aktin. Akibatnya, myosin terlepas dari aktin dan kepala miosin menjadi miring ke arah ujung sarkomer. ATP yang terikat pada miosin dihidrolisis menjadi adenosin difosfat (ADP) dan satu molekul fosfat anorganik, yang keduanya tetap terkait dengan miosin. Dalam posisi miringnya, miosin kemudian berikatan dengan situs baru pada aktin, menciptakan pukulan kuat yang menarik filamen aktin. Setiap kejadian bersepeda lintas-jembatan menghasilkan kepala miosin bergerak ke atas filamen aktin dengan syarat bahwa  $Ca^{2+}$  tetap terikat dengan troponin C. Akhirnya, ADP dilepaskan, dan myosin kembali ke keadaan semula yang kaku dimana ia terikat ke aktin. (Sundberg & Fitts, 2019)

Setelah kontraksi, relaksasi otot terjadi ketika  $\text{Ca}^{2+}$  terakumulasi kembali dalam retikulum sarkoplasma melalui pompa aktif  $\text{Ca}^{2+}$  ATPase (SERCA) pada membrane retikulum sarkoplasma. Pompa ini mengangkut  $\text{Ca}^{2+}$  intraseluler ke dalam retikulum sarkoplasma, yang mempertahankan  $\text{Ca}^{2+}$  intraseluler tetap rendah saat otot berelaksasi. Di dalam retikulum sarkoplasma terdapat protein pengikat  $\text{Ca}^{2+}$  yang disebut calsequestrin, yang berfungsi untuk menurunkan konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  bebas untuk mengurangi jumlah kerja yang diperlukan oleh pompa SERCA. Ketika konsentrasi  $\text{Ca}^{2+}$  intraseluler menurun,  $\text{Ca}^{2+}$  berdisosiasi dari troponin C, memungkinkan tropomiosin untuk kembali memblokir situs pengikatan myosin pada F-aktin. (Sundberg & Fitts, 2019)

Peristiwa kopling eksitasi-kontraksi selalu berurutan dan menunjukkan hubungan temporal. Dengan kata lain, potensial aksi serabut otot selalu mendahului peningkatan  $\text{Ca}^{2+}$  intraseluler, yang selalu mendahului kontraksi otot. Satu potensial aksi tunggal yang menyebabkan peningkatan  $\text{Ca}^{2+}$  intraseluler dari pelepasan retikulum sarkoplasma menghasilkan kontraksi otot tunggal yang dikenal sebagai kedutan. Karena durasi potensial aksi lebih pendek daripada durasi kedutan, serat otot dapat diaktifkan kembali sebelum relaksasi otot terjadi. Jika serabut otot yang sudah aktif distimulasi kembali, tidak ada cukup waktu bagi retikulum sarkoplasma untuk mengakumulasi kembali  $\text{Ca}^{2+}$ . Konsekuensinya,  $\text{Ca}^{2+}$  intraseluler

tetap tinggi, dan kekuatan stimulus kedua menjadi efek aditif terhadap sisa stimulus pertama, mengakibatkan kekuatan tambahan. Fenomena kontraksi berkelanjutan ini disebut tetani. (Shishmarev, 2020)

Hubungan panjang tegangan pada otot menggambarkan ketegangan, atau gaya, yang dihasilkan dari siklus jembatan silang sebagai akibat dari perubahan panjang serat otot. Ketegangan ditentukan dengan mengubah panjang istirahat otot yang telah mengalami kontraksi isometrik. Panjang istirahat ini, juga dikenal sebagai *preload*, oleh karena itu, berasal dari prakontraksi pasif dari kontraksi isometrik. Ketegangan pasif mengacu pada ketegangan yang dihasilkan hanya dari peningkatan panjang otot. Saat *preload* meningkat dan otot dibuat lebih panjang, ketegangannya semakin meningkat. Ketegangan pasif dapat dianggap sebagai tegangan yang dihasilkan dalam karet gelang elastis saat meregang lebih jauh. Ketegangan aktif adalah tegangan yang dikembangkan dari siklus jembatan silang dan sebanding dengan jumlah jembatan silang yang sebenarnya. Ketegangan ini paling tinggi ketika ada tumpang tindih yang optimal antara myosin dan aktin, menghasilkan jumlah jembatan silang yang maksimal. Ketika panjang otot berkurang, filamen berkerumun, yang mengurangi ketegangan. Demikian pula, Ketika panjang otot meningkat, ketegangan aktif menjadi berkurang karena ada lebih sedikit tumpang tindih antara myosin dan aktin, dan dengan

ekstensi, lebih sedikit jembatan silang. Ketegangan total adalah ketegangan yang dihasilkan dari kontraksi otot pada *preload* yang berbeda dan sama dengan jumlah tegangan aktif dan tegangan pasif. Lebih sedikit jembatan penyeberangan. Ketegangan total adalah ketegangan yang dihasilkan dari kontraksi otot pada *preload* yang berbeda dan sama dengan jumlah tegangan aktif dan tegangan pasif. Lebih sedikit jembatan penyeberangan. Ketegangan total adalah ketegangan yang dihasilkan dari kontraksi otot pada *preload* yang berbeda dan sama dengan jumlah tegangan aktif dan tegangan pasif. (Noto *et al.*, 2022)

Hubungan gaya kecepatan mengacu pada kecepatan pemendekan otot sebagai fungsi *afterload*, yang merupakan gaya melawan kontraksi otot. Dalam hubungan ini, *afterload* adalah variabel tetap, berbeda dengan hubungan panjang tegangan, Ketika Panjang otot adalah variabel tetap. Saat *afterload* meningkat, kecepatan pemendekan menurun. Kecepatan maksimal terjadi ketika *afterload* nol pada otot. (Sundberg & Fitts, 2019)

Kontraksi konsentris adalah kondisi pada saat kekuatan kontraksi melebihi kekuatan resistensi, yang menyebabkan pemendekan otot dan insersi otot. Kontraksi eksentrik terjadi ketika kekuatan kontraksi kurang dari kekuatan resistensi. Dengan kata lain, kekuatan resistensi lebih besar daripada kontraksi, menghasilkan

pemanjangan otot dan peningkatan jarak antara otot asal dan insersi.(Sundberg & Fitts, 2019)

### **2.1.2 Kelelahan Otot**

Kelelahan otot didefinisikan sebagai penurunan kekuatan maksimal atau produksi tenaga sebagai akibat dari perubahan aktivitas kontraktil.(Rampichini *et al.*, 2020) Kelelahan otot adalah fenomena yang kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor fisiologis dan psikologis. Salah satu penyebab utama kelelahan otot adalah peningkatan akumulasi produk samping metabolisme saat otot bekerja secara intensif. Ketika otot bekerja, mereka menggunakan oksigen dan bahan bakar seperti glukosa dan asam lemak untuk menghasilkan energi. Proses ini menghasilkan zat-zat samping seperti asam laktat dan hydrogen ion, yang dapat mengganggu kinerja otot dan menyebabkan kelelahan.(Tornero-Aguilera *et al.*, 2022a)

Perlambatan atau penghentian tembakan unit motorik berkontribusi pada hilangnya kekuatan yang menandai kelelahan. Penembakan motoneuron dipengaruhi oleh perubahan intrinsik pada sifat motoneuron, dorongan menurun dan umpan balik aferen. Selama kontraksi maksimal yang melelahkan, laju pembakaran motoneuron menurun karena faktor-faktor berikut: (Sundberg & Fitts, 2019)

(1) Aktivasi berulang (penembakan berulang) motoneuron menyebabkan penurunan rangsangannya terhadap input sinaptik rangsang;

- (2) dorongan rangsang dari korteks motorik atau daerah supraspinal lainnya ke motoneuron lebih rendah;
- (3) penembakan aferen otot kelompok III/IV meningkat, sehingga mengurangi penembakan motoneuron;
- (4) penembakan gelendong otot (reseptor sensorik) menurun, sehingga mengurangi penembakan aferen otot kelompok Ia, meningkatkan penghambatan presinaptik, dan akhirnya menurunkan penembakan motoneuron;
- (5) khususnya, aferen otot kelompok III/IV juga menunjukkan interaksi umpan balik dengan proses kardiovaskular dan pernapasan melalui sistem saraf otonom, sehingga meningkatkan aliran darah otot dan oksigenasi dan akibatnya memperlambat perkembangan kelelahan otot itu sendiri. (Tornero-Aguilera *et al.*, 2022a)

Selain akumulasi produk samping metabolisme, kelelahan otot juga dapat disebabkan oleh gangguan pada persendian, saraf, atau struktur lain yang terkait dengan fungsi otot. Sel-sel otot juga dapat mengalami kerusakan selama aktivitas fisik yang intens, yang menyebabkan ketidakmampuan mereka untuk berkontraksi dengan efisien. Hal ini juga menyebabkan peradangan dan rasa sakit, yang merupakan reaksi alami tubuh sebagai respon terhadap cedera dan stimulus eksternal. (Tornero-Aguilera *et al.*, 2022a)

Aspek psikologis juga berperan dalam kelelahan otot. Faktor-faktor seperti motivasi, perhatian, dan stres dapat mempengaruhi

kinerja fisik seseorang. Selain itu, persepsi kelelahan dan upaya yang dirasakan juga dapat memengaruhi seberapa kuat kelelahan dirasakan oleh seseorang selama atau setelah aktivitas fisik. (Noto *et al.*, 2022)

Berdasarkan penelitian ilmiah, beberapa teori tentang mekanisme kelelahan otot telah diajukan. Salah satunya adalah teori kelelahan sentral, yang menunjukkan bahwa kelelahan terjadi karena adanya gangguan pada system saraf pusat yang mengontrol kontraksi otot. Gangguan ini dapat berupa penurunan kadar neurotransmitter seperti serotonin, yang dapat mempengaruhi komunikasi antara saraf dan otot. (Tornero-Aguilera *et al.*, 2022a)

Sementara itu, teori kelelahan perifer berfokus pada perubahan yang terjadi langsung di dalam otot selama aktivitas fisik. Salah satu aspek utama dari teori ini adalah penurunan kadar ATP (adenosin trifosfat) yang merupakan sumber energi utama untuk kontraksi otot. Selain itu, gangguan pada reseptor otot dan penurunan sensitivitas terhadap kalsium juga dapat menyebabkan kelelahan otot. (Cè *et al.*, 2019; Tornero-Aguilera *et al.*, 2022a)

### **2.1.3 Jenis Kelamin Terhadap Kelelahan Otot**

Jenis kelamin yang berbeda dikatakan dapat mempengaruhi kelelahan otot. Beberapa penelitian terdahulu mengatakan bahwa Wanita memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap kelelahan otot dibandingkan dengan pria. Hal ini dapat disebabkan oleh berbagai

hal.(Castillo-Aguilar *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2021a; Hill *et al.*, 2022; Jo & Bilodeau, 2023; Rakshit *et al.*, 2021; Slopecki *et al.*, 2020; Yang & Côté, 2022)

Perbedaan morfologi dan komposisi tubuh merupakan perbedaan yang paling mudah terlihat Ketika membandingkan keduanya. Pria memiliki panjang segmen dan massa otot yang lebih besar yang menyebabkan keluaran tenaga lebih besar daripada Wanita.(Hill *et al.*, 2022; Rakshit *et al.*, 2021; Slopecki *et al.*, 2020)

Hal lain yang dapat mempengaruhi kelelahan otot pada jenis kelamin yang berbeda adalah hormon. Androgen dapat meningkatkan sintesis protein dan menyebabkan hipertrofi otot. Sedangkan estrogen meningkatkan konsentrasi hormon pertumbuhan yang dapat merangsang lipolisis dan mengurangi aktivitas glikogenolitik dengan mengurangi sekresi adrenalin plasma.(Castillo-Aguilar *et al.*, 2021; Rakshit *et al.*, 2021)

Wanita cenderung memiliki kontribusi anaerobik yang lebih besar dalam metabolisme otot selama aktivitas fisik yang memerlukan daya tahan, seperti lari cepat yang berkepanjangan dan kontraksi isometrik submaksimal. Ini dapat mengarah pada pemulihan yang lebih cepat karena sintesis ATP yang lebih cepat selama pemulihan. Sedangkan pria cenderung memiliki ketergantungan yang lebih besar pada jalur glikolitik selama latihan intensitas tinggi. Hal ini dapat mengakibatkan tingkat kelelahan yang lebih tinggi dan pemulihan

yang lebih lambat. Wanita dan pria memiliki komposisi serat otot yang berbeda, yang dapat menyebabkan perbedaan pada kelelahan otot. (Castillo-Aguilar *et al.*, 2021; Jo & Bilodeau, 2023; Rakshit *et al.*, 2021; Slopecki *et al.*, 2020)

#### 2.1.4 Usia Terhadap Kelelahan Otot

Usia menjadi salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kelelahan otot. Salah satu penyebabnya adalah massa otot, seiring bertambahnya usia, seseorang dapat mengalami penurunan massa otot dan kekuatan otot atau dikenal sebagai *sarcopenia*. (Ashraf *et al.*, 2023; Fogarty *et al.*, 2019; Ross *et al.*, 2023; Sieber, 2019)

## 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

**Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu**

No	Penulis (tahun)	Judul	Bahan	Metode	Hasil
1	Jonasson, G. Ghasemi, M.H. Jonsdottir, U.S. Briem, K. Sveinsson, P. (2023)	Effects of gender and fatigue on strength and activity of gluteus medius muscle during a controlled cutting maneuver in preadolescent athletes	Penelitian ini merupakan studi lintas-seksional dengan 56 anak (usia 10-12 tahun) yang aktif dalam olahraga tim, menguji kekuatan otot pinggul dan aktivitas otot saat melakukan manuver pemotongan	Analisis deskriptif	Tidak ada korelasi yang signifikan antara kekuatan otot pinggul dan aktivitas otot saat melakukan gerakan pemotongan

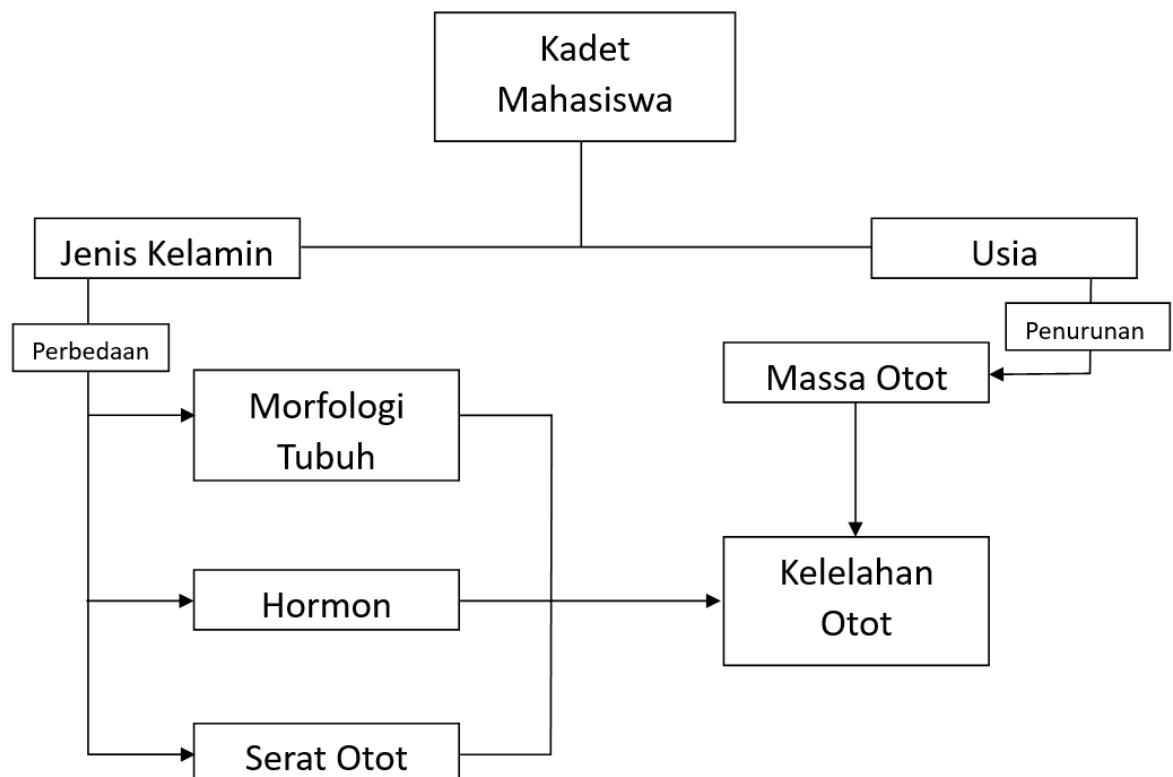
			sebelum dan setelah protokol kelelahan otot.		
2	Thibault Besson, Robin Macchi, Jeremy Rossi, Cédric Y. M. Morio (2022)	Sex Differences in Endurance Running	Review naratif yang mengumpulkan literatur terkini untuk menganalisis perbedaan seks dalam berbagai aspek lari jarak jauh	Analisis deskriptif	perbedaan biomekanika yang mencolok antara jenis kelamin, seperti gerakan sendi panggul dan lutut yang berbeda antara wanita dan pria. Wanita juga memiliki keunggulan dalam beberapa faktor, namun kadang seimbang dengan faktor-faktor lain seperti kapasitas oksigen dan komposisi tubuh.
3	Michael T. Paris, Chris J. McNeil, Geoffrey A. Power, Charles L. Rice, and Brian H. Dalton (2022)	Age-related performance fatigability: a comprehensive review of dynamic tasks	Evaluasi pada <i>peak torque</i> , <i>velocity</i> dan <i>power output</i> , <i>rate of torque</i> dan <i>velocity</i> .		Orang dewasa lebih mudah lelah dibandingkan dengan yang muda dalam <i>high velocity dynamic contraction</i> . Hal ini

					disebabkan oleh beberapa faktor seperti <i>angular velocity</i> dan rotasi sendi.
4	Miguel Gomes, Paulo Santos, Paulo Correia, Pedro Pezarat-Correia & Goncalo V. Mendonca (2021)	Sex differences in muscle fatigue following isokinetic muscle contractions	Dua puluh enam peserta sehat (13 pria: rata-rata usia $23.2 \pm 1.5$ ; 13 wanita: rata-rata usia $21.9 \pm 3.0$ tahun) melakukan kontraksi maksimal isokinetik pada berbagai kecepatan (60, 180, dan $300^\circ.s^{-1}$ ) untuk ekstensi lutut	Kuantitatif	Tidak ada perbedaan jenis kelamin dalam respons terhadap kontraksi isokinetik pada $60^\circ.s^{-1}$ . Namun, setelah latihan pada $300^\circ.s^{-1}$ , wanita mengalami penurunan MVIC yang lebih besar dibandingkan pria ( $-18.4 \pm 5.5$ vs. $-12.9 \pm 3.8$ %; $p = 0.009$ ) dan penurunan output kerja yang lebih besar ( $-34.2 \pm 8.9$ vs. $-27.5 \pm 10.6$ %; $p = 0.017$ ). Wanita juga memiliki pemulihan kekuatan

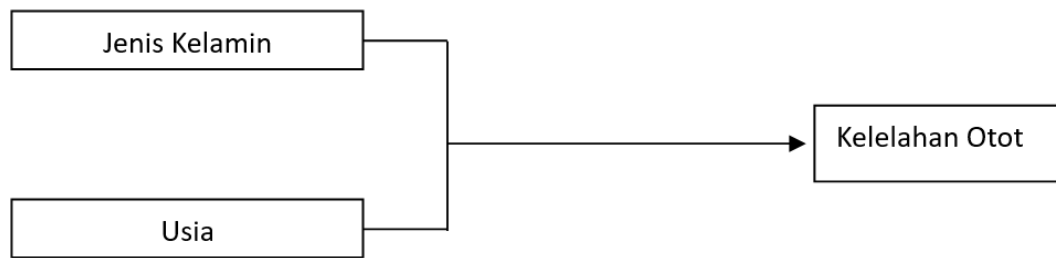
					MVIC yang lebih baik setelah latihan pada $180^{\circ}.s^{-1}$ ( $15.6 \pm 4.1\%$ vs. $6.7 \pm 9.5$ ; $p = 0.003$ ).
5	Sadaf Ashraf, Nabeela Yousuf, Sabah Nisar, Ranjana Gupta (2023)	Muscle strength variations and rate of fatigue in various phases of the menstrual cycle in young adult females of Jammu	Studi prospektif menggunakan an dynamometer grip tangan dan ergograf Mosso untuk mengukur kekuatan otot dan kelelahan otot pada tiga fase siklus menstruasi	kuantitatif	Kekuatan otot secara signifikan lebih tinggi pada Fase 2 (Folikuler Akhir) dibandingkan dengan Fase 1 (Folikuler Awal) dan Fase 3 (Luteal Tengah). Subjek menunjukkan kelelahan yang lebih rendah dan pekerjaan yang lebih tinggi selama fase folikuler akhir (Fase 2) dibandingkan dengan fase luteal tengah (Fase 3) dan fase folikuler awal (Fase 1). Kesimpulannya, fungsi otot lebih

					baik pada fase folikuler akhir dibandingkan dengan fase luteal atau folikuler awal.
--	--	--	--	--	---

### 2.3 Kerangka Berpikir



Gambar 2.1 Kerangka Teori



Gambar 2.2 Kerangka konsep

#### 2.4 Hipotesis Penelitian

Terdapat perbedaan yang signifikan dalam tingkat kelelahan otot antara kelompok jenis kelamin dan usia yang berbeda.